

Abdul Kadir Salam

ILMU TANAH



globalmadani press

ILMU TANAH

ABDUL KADIR SALAM

Guru Besar Ilmu Tanah
Fakultas Pertanian Universitas Lampung



GLOBAL MADANI PRESS
Bandar Lampung

Abdul Kadir Salam – 2020

ILMU TANAH

Abdul Kadir Salam

Directur GM Press : Liza Alvia
Rancangan Kulit : Sahroni



Edisi ke-2

Copy Right © 2020, Global Madani Press

Edisi ke-1 © 2012, Global Madani Press

Jl. Kavling Raya XIV No. 1, Pramuka, Rajabasa,
Bandar Lampung 35144, Indonesia

Telefon : (0721) 8011325

Faksimile : (0721) 8011329

Website : www.globalmadani.sch.id

E-mail : ypgm@globalmadani.sch.id

Hak Cipta dilindungi Undang-Undang. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini dalam bentuk apa pun, baik secara elektronik maupun mekanik, termasuk memotokopi, merekam, atau dengan menggunakan sistem penyimpanan lainnya, tanpa izin tertulis dari Penulis.

UNDANG-UNDANG NOMOR 19 TAHUN 2002 TENTANG HAK CIPTA	
1	Barang siapa dengan sengaja dan tanpa hak mengumumkan atau memperbanyak suatu ciptaan atau memberi izin untuk itu, dipidana penjara paling lama 7 (tujuh) tahun dan/atau denda paling banyak Rp5.000.000.000,00 (Lima Milyar Rupiah) .
2	Barang siapa dengan sengaja menyiarkan, memamerkan, mengedarkan, atau menjual kepada umum suatu ciptaan atau barang hasil pelanggaran Hak Cipta atau Hak Terkait sebagaimana dimaksud pada Ayat (1), dipidana dengan pidana penjara paling lama 5 (lima) tahun dan/atau denda paling banyak Rp500.000.000,00 (Lima Ratus Juta Rupiah) .

Abdul Kadir Salam

ILMU TANAH, Bandar Lampung, 2020

xvi + 393 halaman, 16 x 23 cm

ISBN 978-602-19849-9-4

Abdul Kadir Salam – 2020

PRAKATA (Edisi Ke-2)

Buku ini semula pada Edisi Ke-1 (2012) berjudul **Ilmu Tanah Fundamental** namun dengan berbagai pertimbangan pada Edisi Ke-2 (2020) judul buku ini diubah menjadi **Ilmu Tanah** tanpa fundamental. Salah satu kritik kolega yang mendorong perubahan ini adalah bahwa sebagian pembahasan dan data hasil riset yang digunakan untuk memperkaya buku ini tidak lagi bisa dikatakan fundamental walaupun sebenarnya masih bertujuan untuk mempertajam pemahaman mendasar dalam keilmuan tanah.

Secara faktual, karena Penulis adalah salah seorang penanggung jawab mata kuliah Dasar Ilmu Tanah, buku ini telah digunakan dalam pembelajaran Ilmu Tanah di Universitas Lampung sejak diterbitkan pertama kali pada tahun 2012. Selama delapan tahun terakhir sampai dengan tahun 2020 telah banyak ditemukan beberapa kesalahan ketik dan kekurangan dalam cara penyajian data dalam gambar dan tabel serta telah banyak disampaikan saran-saran perbaikan dari mahasiswa dan kolega. Selain itu dalam bidang ilmu tanah juga telah diterbitkan banyak temuan-temuan baru yang sangat berkaitan dengan beberapa topik bahasan buku ini. Oleh karena itu, sejak tahun 2018 telah diinisiasi usaha-usaha untuk merevisi beberapa bagian dari buku ini sehingga penyajiannya lebih menarik dan lebih mudah difahami dengan dukungan data-data terbaru atau data lama dengan bentuk sajian baru. Termasuk dalam usaha tersebut adalah pengayaan pustaka rujukan, reorganisasi indeks subyek, dan penyusunan takarir, yang sangat diperlukan oleh para pengguna, khususnya terkait dengan istilah-istilah khas yang digunakan dalam bidang Ilmu Tanah.

Buku Ilmu Tanah Edisi Ke-2 ini diharapkan mampu tampil lebih menarik dan lebih mudah difahami oleh para pengguna baik oleh mereka dari bidang pertanian maupun dari bidang non-pertanian khususnya para pemula. Namun demikian, saran dan kritik dari para mahasiswa, para sejawat, dan para pembaca lain tetap diharapkan untuk memperbaiki substansi dan teknik penyajian materi dalam buku ini sehingga misi utama buku ini, yaitu mengantarkan para pemula dalam mempelajari ilmu tanah, pada masa ini maupun masa yang akan datang, dapat terealisasi dengan baik. [~]

Bandar Lampung, 5 Desember 2019 (Hari Tanah Sedunia)

AXA

Abdul Kadir Salam – 2020

PRAKATA (Edisi Ke-1)

Buku ini semula disusun sebagai bahan pendukung pustaka rujukan dasar bagi mahasiswa Mata Kuliah Dasar Ilmu Tanah yang diajarkan di Jurusan Ilmu Tanah Fakultas Pertanian Universitas Lampung pada Tahun Akademik 2009/2010 yang diimplementasikan dengan metode *Student Centered Learning* (SCL), sebagai pelaksanaan proyek penelitian dan pengembangan *Teaching Grant* Proyek A-2 Jurusan Ilmu Tanah Tahun Anggaran 2009. Karena disusun sebagai acuan dasar dalam pembelajaran SCL, buku ini awalnya disusun ringkas, hanya sebagai panduan dasar untuk mengarahkan mahasiswa dalam mencari bahan-bahan lain terkait dengan mata kuliah ini melalui berbagai sumber termasuk sumber-sumber pustaka elektronik.

Namun, dalam perkembangannya, buku ini kemudian diperkaya dengan berbagai hasil penelitian terakhir dalam bidang ilmu tanah yang dilakukan oleh beberapa kolega di Jurusan Ilmu Tanah Universitas Lampung dan perguruan tinggi lain di Indonesia dan di luar negeri. Beberapa bab dalam buku ini juga diperkaya dengan berbagai hasil penelitian Penulis selama 28 tahun terakhir, yang telah diterbitkan di jurnal nasional dan jurnal internasional. Pengayaan ini diharapkan akan menambah bobot keilmuan buku ini dan dapat membedakan buku ini dari buku-buku sejenis yang telah diterbitkan sebelumnya.

Buku dengan judul *Ilmu Tanah* ini terdiri atas 11 bab: Bab I. Pendahuluan, Bab II. Pengenalan Sistem Tanah, Bab III. Pembentukan Sistem Tanah, Bab IV. Fisika Tanah, Bab V. Kimia Tanah, Bab VI. Biologi Tanah, Bab VII. Klasifikasi Tanah, Bab VIII. Survey Tanah, Bab IX. Pengelolaan Kesuburan Tanah, Bab X. Konservasi dan Degradasi Tanah, dan Bab XI. Penutup

Buku ini juga diharapkan dapat menjadi pegangan bagi para mahasiswa baru di bidang pertanian untuk pengenalan ilmu tanah fundamental atau para peminat di bidang pertanian dan lingkungan. Saran dan kritik dari para mahasiswa, para sejawat, dan pembaca lain sangat diharapkan untuk memperbaiki substansi dan penyajian buku ini sehingga misi utama buku ini, yaitu mengantarkan para pemula dalam mempelajari ilmu tanah, dapat terealisasi dengan baik. Kepada Pengelola Proyek Hibah A-2 Jurusan Ilmu Tanah Universitas Lampung diucapkan terimakasih atas dukungan dana dalam penerapan metode SCL, yang juga mencakup penyusunan buku ini sebagai pendukung pembelajaran. Kepada para editor buku ini: Dr. Dyah Indriana Kusumastuti, Prof. Dr. Sri Yusnaini, Dr. Mas Achmad Syamsul Arif, dan Prof. Dr. Nanik Sriyani, diucapkan terimakasih sebesarnya. Kepada

Abdul Kadir Salam – 2020

mereka yang secara teknis telah membantu Penulis dalam penyusunan dan penerbitan buku ini juga dihaturkan terimakasih. [~]

Bandar Lampung, 1 November 2011

AXA

Saya persembahkan untuk isteri: Nanik, anak-anak: Fiqi dan Rahma,
serta ibunda Mujiati dan ayahanda Salam,
~ dengan penuh cinta dan penghargaan setulusnya

Isi Ringkas

1. Pendahuluan, **1**
 2. Pengenalan Sistem Tanah, **15**
 3. Pembentukan Sistem Tanah, **35**
 4. Fisika Tanah, **80**
 5. Kimia Tanah, **126**
 6. Biologi Tanah, **177**
 7. Klasifikasi Tanah, **204**
 8. Survey Tanah, **225**
 9. Pengelolaan Kesuburan Tanah, **237**
 10. Degradasi dan Konservasi Tanah, **288**
 11. Penutup, **329**
- Pustaka Rujukan, **336**
- Takarir, **362**
- Indeks Subyek, **383**
- Riwayat Hidup Penulis, **392**

Isi Rinci

Bab 1

Pendahuluan – 1

- 1.1 Tanah adalah Sokoguru Kehidupan – 1
 - 1.2 Hubungan Mobilitas, Pergerakan, dan Penyerapan Unsur Hara oleh Akar Tanaman – 3
 - a. Pembebasan Unsur Hara dari Padatan Tanah – 4
 - b. Pengangkutan Unsur Hara Melalui Air Tanah – 9
 - c. Penyerapan Unsur Hara oleh Akar Tanaman – 11
 - 1.3 Cakupan *ILMU TANAH* – 11
- Daftar Pertanyaan Utama – 13

Bab 2

Pengenalan Sistem Tanah – 15

- 2.1 Apakah Tanah? – 15
- 2.2 Pedon, Profil, dan Horizonisasi Tanah – 17
- 2.3 Komposisi Tanah – 21
- 2.4 Struktur, Pori, dan Porositas Tanah – 23
- 2.5 Air Tanah – 24
- 2.6 Reaksi Kimia dan Biokimia Tanah – 25
- 2.7 Biologi Tanah – 27
- 2.8 Kesuburan Tanah – 28
- 2.9 Pembentukan, Klasifikasi, dan Survey Tanah – 29

Abdul Kadir Salam – 2020

- 2.10 Degradasi dan Konservasi Tanah – **30**
- 2.11 Pengelolaan Kesuburan Tanah dan Pemupukan – **32**
- Daftar Pertanyaan Utama – **33**

Bab 3

Pembentukan Sistem Tanah – 35

- 3.1 Komposisi Fisika dan Kimia Tanah – **35**
- 3.2 Komposisi Mineral Tanah – **36**
- 3.3 Pelapukan Tanah – **38**
 - a. Pelapukan Fisika – **43**
 - b. Pelapukan Kimia – **44**
 - c. Pelapukan Biologis – **51**
- 3.4 Perkembangan Horizon dan Sifat-Sifat Tanah – **54**
 - a. Faktor Pembentukan Tanah – **56**
 - b. Pengaruh Perubahan pH – **70**
 - c. Perkembangan Muatan Tanah – **71**
 - d. Perubahan Sifat Tanah Lain – **76**
- 3.5 Hubungan Perkembangan Tanah dan Kesuburan Tanah – **77**
- Daftar Pertanyaan Utama – **77**

Bab 4

Fisika Tanah – 80

- 4.1 Komposisi Tanah – **80**
- 4.2 Sifat Fisika Tanah Utama – **83**
 - a. Tekstur Tanah – **83**
 - b. Struktur Tanah – **86**
 - c. Pori dan Porositas Tanah – **87**

- d. Kerapatan Isi dan Kerapatan Partikel Tanah – **92**
- e. Kadar Air dan Konsistensi Tanah – **94**
- f. Warna Tanah – **96**
- g. Temperatur Tanah – **99**
- 4.3 Dinamika dan Pengelolaan Sifat Fisika Tanah – **104**
 - a. Pemadatan Tanah – **104**
 - b. Pengolahan Tanah – **105**
 - c. Pengaruh Humus dan Bahan Organik – **108**
 - d. Infiltrasi, Perkolasi, dan Pencucian – **108**
 - e. Simpanan, Penggunaan, dan Kehilangan Air Tanah – **111**
 - f. Pergerakan Unsur Hara – **115**
 - g. Sistem Drainase – **120**
- Daftar Pertanyaan Utama – **123**

Bab 5

Kimia Tanah – 126

- 5.1 Kimia Tanah – **126**
- 5.2 Nanopartikel Liat dan Humus Tanah – **128**
 - a. Kaolinit – **131**
 - b. Montmorilonit – **131**
 - c. Mika Hidrat – **135**
 - d. Liat Nir-Silikat – **136**
 - e. Bahan Organik dan Humus Tanah – **138**
- 5.3 Reaksi Tanah – **142**
 - a. Pengertian pH – **144**
 - b. Reaksi (pH) Tanah – **144**
 - c. Peranan pH Tanah – **147**
 - d. Kapasitas Sangga Tanah – **150**
 - e. Tanah Asam dan Tanah Alkalin – **154**

Abdul Kadir Salam – 2020

- 5.4 Peranan dan Asal Usul Muatan Negatif Tanah – **161**
- 5.5 Pertukaran Kation – **164**
- 5.6 Daya Jerap Tanah dan Kapasitas Tukar Kation – **169**
- 5.7 Kejenuhan Basa dan Kejenuhan Aluminium – **170**
- 5.8 Hubungan antara Kapasitas Tukar Kation, Kejenuhan Basa, Kejenuhan Aluminium, dan Reaksi Tanah – **171**
- 5.9 Pertukaran Anion – **172**
- Daftar Pertanyaan Utama – **175**

Bab 6

Biologi Tanah– 177

- 6.1 Tanah sebagai Tempat Hidup Mikroorganisme – **177**
- 6.2 Peranan Bahan Organik dan Humus – **179**
- 6.3 Daerah Perakaran dan Rizosfir – **182**
- 6.4 Mikroorganisme Penghuni Tanah – **183**
- 6.5 Makroorganisme Penghuni Tanah dan Akar Tanaman – **189**
- 6.6 Daur Karbon, Nitrogen, dan Belerang – **192**
- 6.7 Nitrifikasi dan Denitrifikasi – **194**
- 6.8 Produksi Enzim Tanah dan Asam Organik – **195**
- Daftar Pertanyaan Utama – **202**

Bab 7

Klasifikasi Tanah – 204

- 7.1 Peranan Klasifikasi Tanah – **204**
- 7.2 Perlunya Horizon Penciri dalam Klasifikasi Tanah – **205**

- 7.3 Sistem Klasifikasi Tanah Modern – **210**
 - 7.4 Order Tanah – **211**
 - a. Entisols – Tanah Primitif – **211**
 - b. Inceptisols – Tanah Muda – **211**
 - c. Aridisols – Tanah Padang Pasir – **214**
 - d. Mollisols – Tanah Padang Rumput – **214**
 - e. Vertisols – Tanah Liat Hitam – **214**
 - f. Spodosols – Tanah Hutan Pinus – **215**
 - g. Alfisols – Tanah dengan Kejenuhan Basa Tinggi – **215**
 - h. Ultisols – Tanah dengan Kejenuhan Basa Rendah – **216**
 - i. Oxisols – Tanah Lapuk – **216**
 - j. Histosols – Tanah Organik – **217**
 - 7.5 Kategori Klasifikasi Lebih Rendah – **218**
 - a. Suborder – **218**
 - b. *Great Group* – **220**
 - c. *Subgroup* – **221**
 - d. Famili dan Seri – **223**
- Daftar Pertanyaan Utama – **224**

Bab 8

Survey Tanah – 225

- 8.1 Peranan dan Manfaat Survey Tanah – **225**
 - 8.2 Tahap Persiapan – **227**
 - 8.3 Tahap Pelaksanaan – **230**
 - 8.4 Tahap Pelaporan – **232**
 - 8.5 Kelas Kemampuan Lahan – **234**
- Daftar Pertanyaan Utama – **235**

Bab 9

Pengelolaan Kesuburan Tanah – 237

- 9.1 Tanah Sebagai Gudang Unsur Hara– **237**
- 9.2 Unsur Hara dan Nutrisi Tanaman – **240**
- 9.3 Bentuk Unsur Hara di dalam Tanah – **244**
- 9.4 Faktor yang Memengaruhi Ketersediaan Hara– **250**
 - a. Pembebasan Unsur Hara dari Padatan Tanah – **253**
 - b. Pengangkutan Unsur Hara Melalui Air Tanah – **257**
 - c. Penyerapan Unsur Hara oleh Akar Tanaman – **257**
- 9.5 Mengukur Ketersediaan Unsur Hara– **260**
- 9.6 Pupuk dan Pemupukan – **270**
- 9.7 Pembenh Tanah– **281**
- Daftar Pertanyaan Utama – **286**

Bab 10

Degradasi dan Konservasi Tanah – 288

- 10.1 Tanah adalah Sumber Daya Alam yang Sangat Berharga – **288**
- 10.2 Degradasi dan Konservasi Tanah – **289**
 - a. Erosi Tanah – **290**
 - b. Pemadatan Tanah – **299**
 - c. Degradasi Tanah Organik – **302**
 - d. Pencemaran Antropogenik dan Degradasi Kimia Tanah – **304**
- Daftar Pertanyaan Utama – **327**

Bab 11

Penutup – 329

11.1 Tanah adalah Sumber Daya Alam Tak Terbarukan – **329**

11.2 Pemanfaatan dan Pemeliharaan Tanah – **331**

11.3 Membatasi Konversi Tanah – **334**

Daftar Pertanyaan Utama – **335**

Pustaka Rujukan, 336

Takarir, 362

Indeks Subyek, 383

Riwayat Hidup Penulis, 392

“..... dan TANAH yang baik: tanamannya tumbuh dengan SUBUR atas ijin Allah; dan tanah yang TIDAK SUBUR: tanamannya hanya TUMBUH MERANA” (QS Al-A’rraf [7]:58)

Bab I: PENDAHULUAN

1.1 Tanah adalah Sokoguru Kehidupan

1.2 Hubungan Mobilitas, Pergerakan, dan Penyerapan Unsur Hara oleh Akar Tanaman

1.3 Cakupan Ilmu Tanah

Daftar Pertanyaan Utama

1.1. Tanah adalah Sokoguru Kehidupan

Tanah adalah **Sokoguru Kehidupan**. Pada abad modern ini, semakin banyak saja fakta ilmiah ditemukan terkait dengan peranan tanah dalam kehidupan. Berbagai fakta tersebut telah semakin meyakinkan manusia bahwa tanah memang benar-benar merupakan tulang punggung kehidupan. Tanpa kehadiran tanah, kehidupan di bumi tentu akan terhenti. Ini karena secara langsung ataupun secara tidak langsung seluruh makhluk hidup di dunia ini sangat tergantung pada eksistensi dan manfaat tanah. Peranan tanah dalam menopang kehidupan tidak

Abdul Kadir Salam – 2020

dapat dengan mudah digantikan oleh media lain dengan kemampuan yang menyamai tanah.

Mengapa kedudukan tanah begitu penting dalam menopang kehidupan? Ini tidak lain karena seluruh makhluk hidup ternyata tersusun oleh anasir-anasir yang sebagian besar berasal dari tanah. Anasir-anasir ini diserap oleh makhluk hidup melalui **Rantai Makanan** dengan tanaman berada di garda terdepan. Tanaman melalui akarnya menyerap anasir-anasir tanah yang disebut **Unsur Hara** dan kemudian memanfaatkannya untuk menyimpan energi yang berasal dari matahari dalam bentuk senyawa-senyawa kimia. Senyawa-senyawa kimia ini, di antaranya dalam bentuk gula, protein, dan lemak, kemudian dimanfaatkan oleh hewan dan manusia melalui rantai makanan. Selain memanfaatkan energi matahari yang sudah diubah dalam bentuk senyawa kimia, hewan dan manusia juga memanfaatkan unsur hara penyusun senyawa kimia tersebut, yang asal usulnya adalah dari dalam tanah. Dengan cara seperti ini, kehidupan di atas tanah dapat berlangsung ribuan bahkan jutaan tahun, dengan matahari sebagai **Sumber Energi**, tanaman sebagai penangkap dan penerus energi sekaligus sebagai **Produsen** kemasan energi matahari dalam bentuk makanan serta hewan dan manusia sebagai **Konsumer**. Akibatnya, hewan dan manusia sangat tergantung pada tanaman, sedangkan tanaman sangat tergantung pada tanah. Alhasil, kesimpulannya sangat sederhana: **No Soil No Food**. Fakta ilmiah menunjukkan bahwa unsur hara yang digunakan oleh tanaman hanya sebagian saja berasal dari sumber lain, sedangkan sebagian besar tentunya berasal dari dalam tanah.

Di dalam tanah, unsur hara kebutuhan tanaman berada dalam berbagai bentuk. Sebagian unsur hara terdapat di dalam **Air Tanah**. Sebagian lagi terdapat di dalam **Padatan Tanah**, baik sebagai bagian struktural dari maupun terikat pada bahan mineral (bahan nir-organik) maupun bahan nir-mineral (bahan organik). Melalui akarnya, tanaman menyerap unsur hara dari air tanah, yang berbatasan langsung dengan padatan tanah. Unsur hara di dalam air tanah bersifat sangat dinamis; dapat meningkat dan menurun tergantung pada faktor masukan dari padatan tanah dan faktor keluaran akibat penyerapan oleh akar tanaman dan mekanisme-mekanisme lain. Selain dapat diserap oleh akar tanaman, unsur hara di dalam air tanah dapat pula mengalami pencucian (*leaching*) oleh air perkolasi yang bergerak di dalam tubuh tanah akibat gaya gravitasi bumi. Kehilangan melalui proses **Penyerapan** oleh akar tanaman maupun melalui proses **Pencucian** dapat menurunkan konsentrasi unsur hara di dalam air tanah. Dalam keadaan ideal, penurunan konsentrasi ini akan disangga oleh unsur hara yang berasal dari padatan tanah, sehingga konsentrasi unsur hara di dalam air tanah akan terjaga dengan baik.

Abdul Kadir Salam – 2020

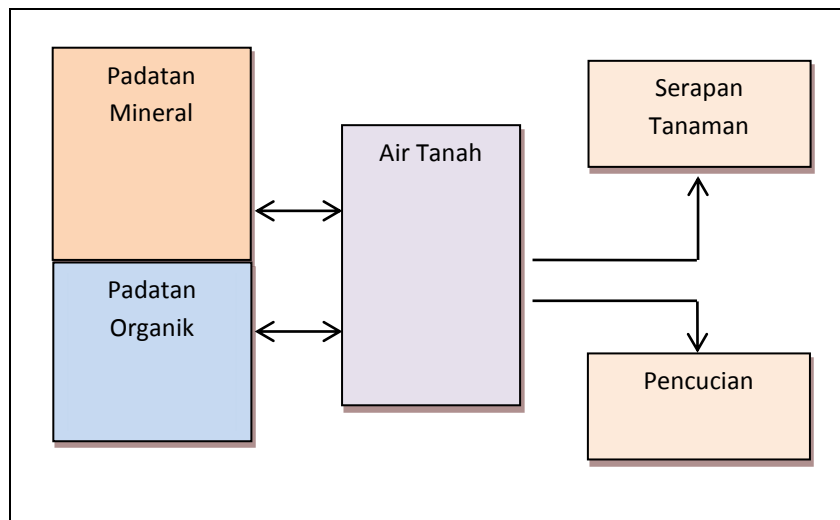
Penyanggaan konsentrasi unsur hara di dalam air tanah dilakukan oleh unsur hara yang dibebaskan dari padatan tanah melalui berbagai proses kimia tanah. Proses pembebasan unsur hara dari padatan tanah terdiri atas: (1) **Desorpsi Ion** yang terikat pada padatan tanah (organik dan nir-organik), (2) **Pelapukan** padatan mineral (nir-organik), dan (3) **Dekomposisi** padatan nir-mineral (organik). Proses pembebasan akan berlangsung selama konsentrasi unsur hara di dalam air tanah relatif rendah dan kondisi kesetimbangan belum tercapai. Bila konsentrasi unsur hara di dalam air tanah terlalu tinggi, proses pembebasan unsur hara dengan sendirinya akan terhenti atau terhambat. Dalam keadaan demikian, sebagian unsur hara yang larut dalam air tanah bahkan akan terikat oleh atau mengendap menjadi padatan tanah melalui reaksi **Adsorpsi** dan/atau **Pengendapan**.

Hubungan fisika-kimia antara air tanah dan padatan tanah merupakan faktor yang sangat penting dalam menentukan peranan tanah sebagai sokoguru kehidupan. Semakin tinggi kandungan unsur hara di dalam padatan tanah (**Tanah Subur**) dan semakin cepat pembebasannya ke dalam air tanah akan semakin baik pula peranan tanah dalam menunjang kehidupan. Sebaliknya, semakin miskin tanah (**Tanah Miskin**) akan semakin rendah jumlah dan kecepatan pasokan unsur haranya ke dalam air tanah, sehingga akan semakin lemah peranan tanah dalam menopang kehidupan. Tanah seperti ini biasanya memerlukan **pemupukan** untuk meningkatkan kesuburannya sehingga dapat memasok unsur hara dalam jumlah dan kecepatan yang sesuai dengan kebutuhan tanaman. Hubungan antara air tanah dan padatan tanah diperlihatkan pada **Gambar 1.1**.

1.2. Hubungan Mobilitas, Pergerakan, dan Penyerapan Unsur Hara oleh Akar Tanaman

Sebelum diserap oleh akar tanaman, setiap jenis unsur hara harus berada dalam keadaan larut di dalam air tanah dan berada dekat dengan permukaan akar tanaman. Namun demikian, tidak seluruh unsur hara di dalam air tanah berada dekat dengan permukaan akar tanaman. Dalam kenyataan, sebagian unsur hara bahkan terikat kuat pada atau merupakan bagian struktural dari mineral atau bahan organik tanah. Oleh karena itu, untuk dapat diserap oleh akar tanaman, unsur hara dalam padatan tanah harus melalui beberapa tahapan, yaitu: (a) pembebasan dari padatan tanah, (b) pengangkutan melalui air tanah, dan (c) penyerapan oleh akar tanaman (Salam, 1998).

Kelancaran ketiga tahapan di atas sangat menentukan peranan tanah sebagai sokoguru kehidupan. Dalam **Tanah Muda**, yang memiliki berbagai jenis mineral yang mudah lapuk, dengan struktur tanah yang memungkinkan pergerakan unsur hara secara cepat, penyediaan unsur hara yang dapat segera diserap oleh akar tanaman biasanya tidak merupakan masalah dalam pertanian. Sebaliknya, dalam **Tanah Tua** yang miskin mineral-mineral yang mudah lapuk, penyediaan unsur hara ke permukaan akar tanaman biasanya merupakan masalah kesuburan tanah yang selalu hadir.



Gambar 1.1. Hubungan antara Padatan Tanah dan Air Tanah.

a. Pembebasan Unsur Hara dari Padatan Tanah

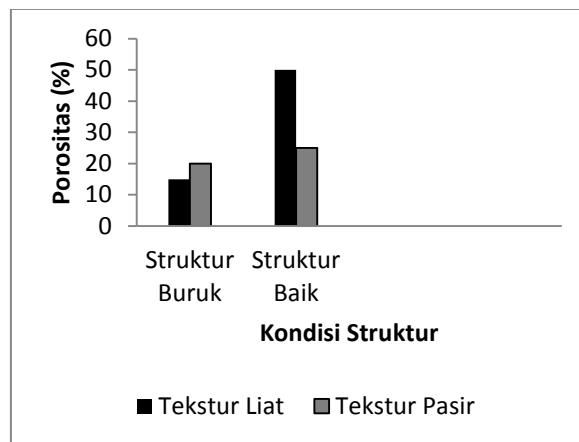
Pembebasan unsur hara dari padatan tanah tergantung pada sifat padatan tanah dan sifat tanah. Sifat padatan tanah mencakup jenis padatan, struktur padatan, ukuran padatan, dan komposisi padatan. Jenis padatan tanah dapat berupa **Padatan Mineral** (Nir-Organik), Padatan Nir-Mineral (**Organik**), atau dapat juga berupa pupuk (organik atau nir-organik). Ketiga jenis padatan ini juga memiliki komposisi kimia yang berbeda; padatan mineral sebagian besar terdiri atas Silikon

(Si), Aluminium (Al), dan Oksigen (O) sedangkan padatan organik sebagian besar terdiri atas Karbon (C), Hidrogen (H), dan O.

Tidak seperti pelapukan padatan mineral, dekomposisi padatan organik umumnya memerlukan kehadiran enzim, yang merupakan **Biokatalisator** yang dihasilkan oleh mikroorganisme pengurai (**Decomposer**), makroorganisme seperti cacing tanah, dan akar tanaman (Tabatabai, 1982; Burns, 1986). **Struktur padatan** yang banyak memiliki rekahan atau porus umumnya lebih mudah terurai melalui pelapukan atau dekomposisi karena agen pengurai/pelapuk akan lebih mudah terinfiltrasi ke dalam struktur padatan. Dalam banyak hal, **ukuran padatan** sangat menentukan kecepatan pelapukan atau dekomposisi. Secara umum, semakin halus padatan akan semakin cepat juga proses pelapukan atau dekomposisi padatan disebabkan oleh lebih luasnya bidang reaksi (Hillel, 1980). Luas permukaan per satuan massa dari padatan halus lebih tinggi daripada padatan kasar. Padatan mineral dengan kandungan unsur yang mudah teroksidasi seperti Fe dan Mn akan lebih mudah melapuk dan membebaskan unsur hara karena reaksi reduksi-oksidasi merupakan salah satu mekanisme kimia pelapukan mineral (Bohn dkk., 1985; Singer dan Munns, 1987). Padatan organik dengan **nisbah C/N** rendah juga akan lebih mudah terdekomposisi, khususnya bila kandungan N relatif tinggi sehingga dapat meningkatkan populasi dan aktivitas mikroorganisme, yang merupakan agen terpenting dalam dekomposisi bahan organik tanah (Alexander, 1977).

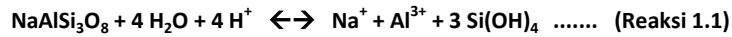
Faktor sifat tanah yang memengaruhi proses pelapukan/dekomposisi padatan tanah di antaranya mencakup tekstur dan struktur tanah, temperatur, kadar air, pH, komposisi kimia larutan tanah, serta populasi dan aktivitas makroorganisme dan mikroorganisme tanah (Bohn dkk., 1985). **Tekstur Tanah** adalah perbandingan relatif antara fraksi pasir, debu, dan liat, sedangkan **Struktur Tanah** adalah tata penyusunan fraksi pasir, debu, dan liat dalam tiga dimensi. **Fraksi Tanah** adalah partikel-partikel padatan tanah dengan ukuran tertentu: **Pasir** adalah partikel yang terkasar dengan ukuran diameter 0.05 – 2 mm; **Debu**, lebih halus daripada pasir, dengan ukuran diameter 0.002 – 0.05 mm; dan **Liat** adalah partikel paling halus dengan ukuran diameter ≤ 0.002 mm atau ≤ 2 μm . Tekstur dan struktur tanah akan menentukan **Porositas Tanah**, yang menunjukkan bagian dari tanah yang berongga dan diisi oleh air dan/atau udara. Semakin kasar tekstur tanah umumnya semakin porus. Porositas pada gilirannya akan menentukan **Aerasi Tanah**, yang merupakan pemasok oksigen yang diperlukan dalam proses pelapukan mineral dan dekomposisi bahan organik tanah oleh makroorganisme dan mikroorganisme tanah. Hubungan hipotetik antara porositas, tekstur, dan struktur tanah diperlihatkan pada **Gambar 1.2**.

Dengan struktur tanah yang buruk, tanah dengan tekstur pasir dapat memiliki porositas yang lebih tinggi daripada tanah dengan tekstur liat. Ini karena partikel-partikel pasir berukuran besar, sehingga di antara partikel-partikel yang menyatu terdapat rongga-rongga yang lebih besar daripada yang terdapat di dalam tanah dengan tekstur liat. Sebaliknya, dalam kondisi struktur yang baik, tanah dengan tekstur liat dapat memiliki porositas yang lebih tinggi dibandingkan dengan tanah dengan tekstur pasir, sebab keberadaan liat akan memperbaiki agregasi tanah sehingga menghasilkan ruang pori yang lebih baik. Namun demikian, perbaikan struktur tanah dapat memperbaiki porositas tanah dengan tekstur pasir maupun liat. Perbaikan porositas tanah tentu akan mempercepat pelapukan mineral dan bahan organik tanah.

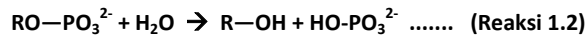


Gambar 1.2. Hubungan hipotetik antara porositas, tekstur, dan struktur tanah.

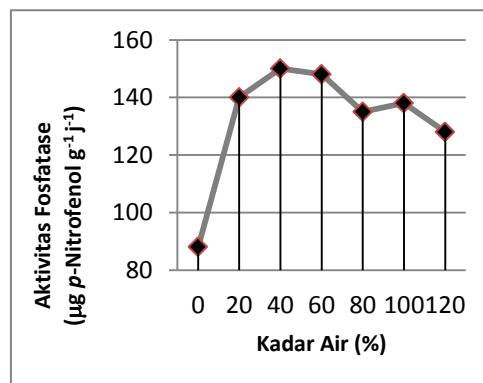
Kadar Air tanah juga sangat menentukan pembebasan unsur hara dari padatan tanah. Hal ini terkait dengan proses hidrasi atau hidrolisis, yang sangat berhubungan dengan keberadaan air tanah. Reaksi hidrasi atau hidrolisis akan berlangsung lebih cepat dengan meningkatnya kadar air tanah. Sebagai contoh, berikut ini adalah reaksi **pelapukan Albit** (Na-Feldspars), yang terjadi berkaitan erat dengan kehadiran air (Bohn dkk., 1985):



Contoh lain yang terkait dengan peranan kadar air tanah adalah reaksi biokimia perombakan padatan P-organik yang membebaskan ortofosfat primer (HPO_4^{2-}) dengan melibatkan **Enzim Fosfatase** yang dihasilkan oleh makroorganisme dan mikroorganisme tanah. Reaksi ini mutlak memerlukan air sebagai salah satu reaktan. Tanpa kehadiran air, reaksi pembebasan P nir-organik tersebut dari P-organik di dalam tanah tidak akan pernah terjadi. Reaksi tersebut adalah sebagai berikut (Tabatabai, 1982):



Keberadaan air tentunya dibatasi oleh keharusan untuk juga menyediakan O_2 di dalam tanah. **Oksigen** juga diperlukan oleh makroorganisme, mikroorganisme tanah, dan akar tanaman dalam melakukan respirasi senyawa organik untuk menghasilkan energi. Oleh karena itu, keberadaan air dapat meningkatkan proses pelapukan mineral atau dekomposisi bahan organik tanah hanya sampai batas tertentu saat pasokan O_2 untuk respirasi tidak terganggu. Kadar air yang terlalu tinggi juga akan mengganggu aktivitas enzim tanah karena terganggunya populasi dan aktivitas mikroorganisme penghasil enzim (**Gambar 1.3.**).



Gambar 1.3. Pengaruh kadar air terhadap aktivitas enzim fosfatase tanah (Salam, 1998a).

Reaksi tanah (pH) juga sangat berpengaruh terhadap proses pelapukan padatan mineral tanah. Hal ini disebabkan karena ion H^+ adalah agen penyerang (**Attacking Agent**) yang dapat menghancurkan mineral tanah serta membebaskan unsur penyusunnya, misalnya pelepasan K dari K yang tidak dapat dipertukarkan menjadi K larut (Farshadirad dkk, 2012; Najafi-Ghiri, 2012). Secara umum, proses pelapukan mineral tanah meningkat dengan menurunnya pH tanah, sehingga semakin banyak unsur yang dibebaskan dari padatan mineral dengan menurunnya pH tanah (Salam, 1989). Fenomena ini diperlihatkan pada **Tabel 1.1**, yang menunjukkan meningkatnya pembebasan unsur hara dari tanah Oxisols dan Mollisols dengan menurunnya pH tanah. Jumlah absolut unsur hara yang dibebaskan sangat tergantung pada jenis dan tingkat kesuburan tanah. Tanah Mollisols, yang merupakan tanah subur, membebaskan unsur hara dalam jumlah lebih tinggi daripada tanah Oxisols, yang merupakan tanah miskin.

Tabel 1.1. Peningkatan pembebasan unsur hara dari mineral tanah dengan menurunnya pH tanah*.

pH	Mollisols*				Oxisols**			
	Ca	Mg	K	Zn	Ca	Mg	K	Zn
 mg kg ⁻¹							
4	594	271	96	11	26	27	85	6.5
5	540	250	60	10	19	9	50	6.0
6	315	105	48	8.5	12	0	45	5.5
7	204	49	47	7.4	3.0	0	30	4.0

*Diadaptasi dari Salam (1989); *dari Wisconsin Amerika Serikat, ** dari Jawa Barat Indonesia

Komposisi kimia air tanah juga dapat memengaruhi pembebasan unsur hara dalam pelapukan padatan mineral maupun dekomposisi bahan organik tanah. Konsentrasi ion Na^+ yang tinggi di dalam tanah akan menurunkan kecepatan pembebasan ion Na^+ dalam pelapukan Albit (**Reaksi 1.1**). Fenomena ini berkaitan dengan berlakunya **Hukum Aksi Massa**. Pelapukan Albit akan kembali berjalan cepat bila sebagian ion Na^+ dikeluarkan dari air tanah melalui pengikatan oleh

koloid tanah atau penyerapan oleh akar tanaman atau pencucian oleh air perkolasi. Demikian juga konsentrasi ion H_2PO_4^- yang tinggi dalam proses dekomposisi padatan P-organik dalam kehadiran enzim fosfatase (**Reaksi 1.2**). Keberadaan ion H_2PO_4^- akan menghambat proses dekomposisi padatan P-organik tanah. Dekomposisi P-organik dapat dipercepat bila ion H_2PO_4^- dikeluarkan dari air tanah dengan penyerapan oleh tanaman atau mekanisme lain.

Karena merupakan penghasil enzim, yang merupakan katalisator dalam dekomposisi padatan organik tanah, populasi dan aktivitas makroorganisme dan mikroorganisme tanah juga sangat memengaruhi proses pembebasan unsur hara ke dalam air tanah. Dengan demikian, berbagai faktor tanah yang memengaruhi populasi dan aktivitas makroorganisme dan mikroorganisme tanah dengan sendirinya akan memengaruhi pembebasan unsur H_2PO_4^- oleh padatan organik tanah (Salam dkk., 1997d).

b. Pengangkutan Unsur melalui Air Tanah.

Setelah dibebaskan, unsur hara akan memasuki air tanah yang berbatasan dengan padatan tanah dan mengalami berbagai reaksi: (a) dijerap oleh padatan tanah, khususnya oleh koloid tanah, baik pada padatan organik maupun pada padatan nir-organik, (b) mengalami pencucian oleh air perkolasi, atau (3) mengalami penyerapan oleh akar tanaman. Untuk dapat diserap oleh akar tanaman, unsur hara harus berada di dekat permukaan akar tanaman. Namun demikian, tidak semua unsur hara yang dibebaskan oleh padatan tanah berada di dekat permukaan akar tanaman. Fakta ini mengakibatkan unsur hara harus bergerak mendekati permukaan akar tanaman atau, sebaliknya, akar tanaman yang harus “bergerak” menuju titik tempat unsur hara terkonsentrasi.

Pergerakan unsur hara menuju permukaan akar tanaman dapat terjadi melalui proses aliran massa, difusi, dan/atau intersepsi oleh akar. **Aliran Massa** adalah proses pergerakan unsur hara bersama gerakan air tanah. Air tanah sendiri bergerak dari titik-titik dengan potensial air rendah ke titik-titik dengan potensial air tinggi. **Difusi** adalah proses pergerakan unsur hara dari titik-titik dengan konsentrasi unsur hara tinggi ke titik-titik dengan konsentrasi unsur hara rendah. **Intersepsi oleh Akar** adalah penyerapan langsung oleh akar tanaman karena akar tanaman berada sangat dekat dengan posisi unsur hara. Sesungguhnya intersepsi oleh akar tanaman adalah aliran massa atau difusi dengan jarak yang sangat dekat. Dalam proses ini, akar tanaman sebenarnya tidak secara langsung menyerap unsur hara dari padatan tanah. Unsur hara sebelumnya dibebaskan dari padatan tanah

Abdul Kadir Salam – 2020

ke dalam film air yang sangat tipis, kemudian akar tanaman menyerapnya dari film air tersebut.

Proses pergerakan unsur hara sangat dipengaruhi oleh beberapa sifat tanah dan lingkungan, mencakup: tekstur dan struktur tanah, porositas tanah, kadar air, jenis unsur hara, konsentrasi unsur hara, temperatur tanah, kebutuhan tanaman terhadap unsur hara, dan radiasi matahari (Salam, 1998b). **Tekstur dan struktur tanah** sangat berkaitan dengan porositas tanah. **Porositas tanah** sangat berpengaruh terhadap keberadaan lapisan air di sekitar partikel tanah atau dinding pori tanah yang saling berhubungan, yang merupakan jalan bagi unsur hara untuk bergerak dari satu titik ke titik lain di dalam tanah. Oleh karena itu, **kadar air** tanah juga sangat menentukan kelancaran pergerakan unsur hara.

Tidak setiap unsur hara bergerak dengan semua mekanisme di atas. Sebagian besar Nitrogen (N) diangkut menuju akar tanaman melalui mekanisme aliran massa. Sebagian besar Fosfor (P) dan Kalium (K) bergerak dengan mekanisme difusi. **Mobilitas unsur hara** di dalam tanah juga berbeda antara satu unsur dengan unsur lainnya. Misalnya, N bergerak lebih cepat dibandingkan dengan K. Salah satu penyebabnya adalah perbedaan muatan antara kedua unsur hara ini. Nitrogen di dalam air tanah bergerak dalam bentuk ion NO_3^- , sehingga pergerakannya tidak terhambat oleh muatan negatif koloid tanah, yang bermuatan negatif. Sebaliknya, K di dalam tanah bergerak dalam bentuk ion K^+ , sehingga pergerakannya akan sangat terhambat oleh muatan negatif koloid tanah. Dengan demikian, di dalam tanah dengan koloid bermuatan negatif, mobilitas **Anion** akan lebih tinggi daripada mobilitas **Kation**. Dengan alasan serupa, dapat disimpulkan bahwa di dalam tubuh tanah $\text{NH}_4\text{-N}$ akan bergerak lebih lambat dibandingkan dengan $\text{NO}_3\text{-N}$. Dengan latar belakang seperti ini, McCreren dkk. (1994) melaporkan bahwa laju pencucian $\text{NH}_4\text{-N}$ dalam sebuah Alfisol lebih rendah daripada laju pencucian $\text{NO}_3\text{-N}$.

Temperatur tanah secara langsung akan berpengaruh terhadap mobilitas unsur hara di dalam tanah karena vibrasi atom unsur hara akan lebih tinggi dengan meningkatnya temperatur tanah. Secara teori, peningkatan temperatur sebesar 10°C akan melipatduakan atau melipattigakan kecepatan reaksi (Sparks, 1989). Dengan demikian, pemanasan tanah oleh **Radiasi Matahari** dapat meningkatkan pergerakan unsur hara di dalam tanah. Selain karena pengaruhnya terhadap vibrasi atom, radiasi matahari juga meningkatkan transpirasi air oleh daun tanaman, yang pada gilirannya dapat meningkatkan proses penyerapan unsur hara dari sekitar perakaran yang diangkut melalui aliran massa atau difusi. Jumlah unsur hara yang diserap oleh akar tanaman tentunya sangat tergantung pada konsentrasi unsur hara di dalam air tanah. Selain itu, jumlah unsur hara yang diserap oleh akar

tanaman juga tergantung pada **Kebutuhan Tanaman** terhadap berbagai jenis unsur hara, karena tanaman menyerap unsur hara secara selektif sesuai dengan kebutuhannya.

c. Penyerapan Unsur Hara oleh Akar Tanaman

Tanaman akhirnya menyerap unsur hara yang telah diangkut menuju atau sudah berada di permukaan akar tanaman. Penyerapan akan berlangsung melalui dua tahapan: (1) penyerapan pada wilayah luar (*outer-space absorption*) dan (2) penyerapan pada wilayah dalam (*inner-space absorption*) (Tisdale dkk.,1985).

Outer-Space Absorption memiliki sifat-sifat: 1. unsur hara berada di dalam air tanah atau di permukaan akar tanaman, 2. dipengaruhi oleh pertukaran kontak, aliran massa, dan/atau difusi, 3. stoikiometrik, dalam pemahaman bahwa unsur hara yang diserap dapat dipertukarkan dengan unsur lain di dalam air tanah, 4. dapat balik (*reversible*), 5. tidak selektif, unsur apa saja dapat diserap; dan 6. tidak metabolik, karena tidak ada senyawa biokimia yang terlibat dalam proses penyerapan.

Sebaliknya **Inner-Space Absorption** memiliki sifat-sifat: 1. akar tanaman aktif, 2. metabolik, karena melibatkan senyawa biokimia yang berfungsi sebagai *carrier* yang dapat mengompleks dan mengangkut unsur hara, 3. spesifik, setiap *carrier* hanya untuk unsur hara tertentu, 4. selektif, tidak menyerap unsur hara selain yang diperlukan tanaman, 5. ion diangkut ke vakuola atau sitoplasma sehingga tidak dapat balik dan tidak dapat dipertukarkan, 6. *carrier* membebaskan unsur hara di sitoplasma dan kembali mengompleks unsur hara lain di permukaan akar tanaman untuk diangkut. Perbedaan antara kedua jenis penyerapan tersebut disajikan pada **Tabel 1.2.**

1.3 Cakupan Ilmu Tanah

Ilmu Tanah adalah ilmu yang mempelajari pembentukan dan dinamika berbagai komponen biotik dan abiotik tanah dan interaksinya di dalam sistem tanah, baik secara kimia, fisika, maupun biologis. Berbagai cabang Ilmu Tanah telah berkembang, di antaranya adalah **Genesis Tanah**, yang mempelajari proses pembentukan tanah; **Taksonomi Tanah**, yang mempelajari pengelompokan tanah;

Ilmu Kimia Tanah, yang mempelajari dinamika dan interaksi kimia berbagai komponen tanah; **Ilmu Fisika Tanah**, yang mempelajari dinamika dan interaksi fisika berbagai komponen tanah; **Biologi Tanah**, yang mempelajari berbagai organisme tanah serta interaksinya dengan berbagai komponen tanah.

Tabel 1.2. Perbedaan antara *Outer-* dan *Inner-Space Absorption**.

<i>Outer-Space Absorption</i>	<i>Inner- Space Absorption</i>
<ul style="list-style-type: none"> • Unsur hara di dalam air tanah atau di permukaan akar tanaman 	<ul style="list-style-type: none"> • Unsur hara tanaman di dalam akar tanaman
<ul style="list-style-type: none"> • Penyerapan bersifat pasif; dipengaruhi oleh pertukaran kontak, aliran masa, dan/atau difusi 	<ul style="list-style-type: none"> • Akar tanaman aktif
<ul style="list-style-type: none"> • Tidak metabolik 	<ul style="list-style-type: none"> • Metabolik; <i>Carrier</i> diproduksi tanaman untuk mengompleks unsur hara
<ul style="list-style-type: none"> • Tidak spesifik 	<ul style="list-style-type: none"> • Spesifik
<ul style="list-style-type: none"> • Tidak selektif 	<ul style="list-style-type: none"> • Selektif
<ul style="list-style-type: none"> • Dapat balik; stoikiometrik; unsur hara dapat dipertukarkan 	<ul style="list-style-type: none"> • Ion diangkut ke vakuola atau sitoplasma sehingga tidak dapat balik dan tidak dapat dipertukarkan • <i>Carrier</i> membebaskan ion unsur hara dan kembali mengompleks unsur hara lain di permukaan akar untuk diangkut

*Diadaptasi dari Tisdale dkk. (1985)

Buku *Ilmu Tanah* ini terdiri dari 11 bab. **Bab I. Pendahuluan**, memberikan gambaran tentang peranan tanah sebagai sokoguru kehidupan serta mobilitas unsur hara dimulai dari pembebasannya oleh padatan tanah sampai diserap oleh akar tanaman. **Bab II. Pengenalan Sistem Tanah**, memberikan pemahaman umum tentang sistem tanah ditinjau dari sisi fisika, kimia, dan biologi. **Bab III. Pembentukan Sistem Tanah**, memberikan pemahaman terhadap bagaimana

Abdul Kadir Salam – 2020

sistem tanah terbentuk dan berbagai sifatnya berkembang. **Bab IV. Fisika Tanah**, memberikan gambaran tentang berbagai komponen fisika tanah serta interaksi dan pengaruhnya terhadap sifat kimia dan biologi tanah. **Bab V. Kimia Tanah**, memberikan pemahaman tentang berbagai komponen dan reaksi kimia di dalam sistem tanah. **Bab VI. Biologi Tanah**, memberikan pemahaman tentang berbagai jenis organisme di dalam tanah dan hubungannya dengan berbagai sifat kimia dan fisika tanah. **Bab VII. Klasifikasi Tanah**, memberikan gambaran tentang bagaimana mengelompokkan berbagai jenis tanah sesuai dengan sistem penamaan baku. **Bab VIII. Survey Tanah**, memberikan gambaran tentang tatacara yang harus dilakukan dalam mengevaluasi tanah berdasarkan berbagai data serta menyajikannya dalam bentuk laporan. **Bab IX. Pengelolaan Kesuburan Tanah**, memberikan gambaran tentang bagaimana mengelola berbagai sifat fisika, kimia, dan biologi tanah untuk meningkatkan produksi tanaman. **Bab X. Degradasi dan Konservasi Tanah**, menggambarkan tentang bagaimana cara untuk memelihara dan/atau meningkatkan potensi kesuburan tanah dan menghindarkannya dari kerusakan. **Bab XI. Penutup**, mengungkapkan tentang berbagai hal paling penting yang perlu ditegaskan terkait dengan tanah dan Ilmu Tanah. [~]

Daftar Pertanyaan Utama

1. Bagaimanakah pendapat Saudara tentang pentingnya tanah sebagai Sokoguru Kehidupan?
2. Bagaimanakah hubungan antara Tanah – Hara – Air Tanah – Tanaman? Gambarkan dengan sebuah model konseptual!
3. Menurut pendapat anda apakah persyaratan sebuah unsur hara agar dapat diserap oleh akar tanaman di dalam sistem tanah ?
4. Uraikan tentang bagaimana cara Padatan Tanah memasok unsur hara dalam Air Tanah sehingga dapat diserap oleh akar tanaman!
5. Uraikan beberapa sifat padatan tanah dan faktor lingkungan yang memengaruhi kecepatan pembebasan unsur hara dari padatan tanah!
6. Uraikan bagaimana unsur hara bergerak di dalam Air Tanah dengan mekanisme Aliran Massa, Difusi, dan Intersepsi oleh Akar Tanaman!
7. Uraikan perbedaan mobilitas unsur hara di dalam sistem tanah!
8. Jelaskan mengapa $\text{NO}_3\text{-N}$ di dalam tanah tercuci lebih cepat dibandingkan dengan $\text{NH}_4\text{-N}$ dan ion K^+ ?
9. Mengapa kadar air tanah sangat memengaruhi pergerakan unsur hara di dalam tanah?

Abdul Kadir Salam – 2020

10. Jelaskan mengapa struktur dan porositas tanah sangat perlu diperhatikan dalam membahas pergerakan unsur hara di dalam tanah!
11. Jelaskan bagaimana radiasi matahari dapat memengaruhi pergerakan unsur hara di dalam tanah!
12. Uraikan perbedaan dua jenis penyerapan unsur hara oleh akar tanaman!

“..... dan Dia lebih mengetahuimu ketika dia menjadikanmu dari TANAH” (QS An-Najm [53]:32)

BAB II: PENGENALAN SISTEM TANAH

- 2.1 Apakah Tanah?
 - 2.2 Pedon, Profil, dan Horizonisasi Tanah
 - 2.3 Komposisi Tanah
 - 2.4 Struktur, Pori, dan Porositas Tanah
 - 2.5 Air Tanah
 - 2.6 Reaksi Kimia dan Biokimia Tanah
 - 2.7 Biologi Tanah
 - 2.8 Kesuburan Tanah
 - 2.9 Pembentukan, Klasifikasi, dan Survey Tanah
 - 2.10 Degradasi dan Konservasi Tanah
 - 2.11 Pengelolaan Kesuburan Tanah dan Pemupukan
- Daftar Pertanyaan Utama*

2.1. Apakah Tanah?

Setiap orang mengenal tanah. Mereka mengenal tanah dengan sudut pandangnya masing-masing. Seorang petani misalnya mengenal dan memahami tanah sebagai media pertumbuhan tanaman. Sudut pandang petani mengakibatkan penilaian tanah berada dalam dimensi kesuburan tanah;

Abdul Kadir Salam – 2020

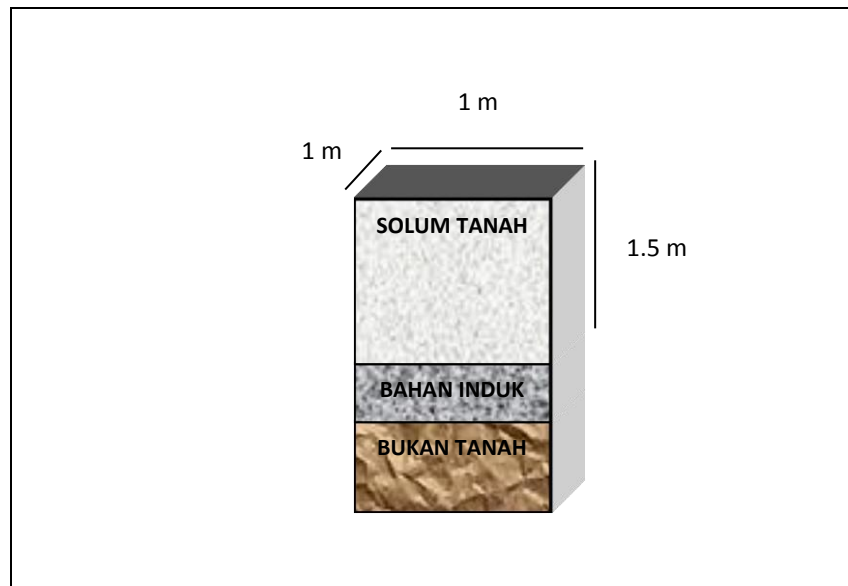
apakah tanah dapat dijadikan sebagai media tumbuh tanaman sehingga dapat menghasilkan produk yang dapat dijual dan menguntungkan untuk memenuhi kebutuhan hidup. Seorang ahli bangunan mengenal dan memahami tanah sebagai tempat berpijaknya berbagai bangunan yang didirikannya. Bila bangunan tinggi dibangun di atas tanah dengan struktur yang buruk, bagaimana cara mengatasinya, dan seterusnya. Pandangan berbagai ahli terhadap tanah dapat sama sekali berbeda tergantung pada kepentingannya. Namun demikian, dalam mempelajari tanah ada suatu kesamaan yang bisa difahami oleh setiap orang.

Secara kasat mata, sebagian orang menganggap tanah sebagai bangunan dua dimensi, yaitu dimensi panjang dan dimensi lebar, sehingga kita sering mengekspresikan tanah berdasarkan luasannya. Jual beli tanah umumnya dilakukan berdasarkan luasannya, misalnya Rp250.000,00 per m² atau Rp120 juta per hektare. Dengan demikian, luasan kepemilikan tanah dapat menunjukkan derajat kekayaan seseorang. Penilaian seperti ini tidak saja terjadi di jaman dahulu kala, pada saat seorang tuan tanah bisa memiliki ribuan hektare tanah, tetapi juga pada jaman sekarang, pada saat harga tanah sudah meroket, khususnya di wilayah perkotaan atau wilayah yang memiliki nilai ekonomi relatif tinggi.

Sebagian orang melihat tanah tidak hanya sekadar sebagai bangunan dua dimensi, tetapi merupakan bangunan tiga dimensi. Tanah tidak hanya dilihat dari dimensi panjang dan dimensi lebar, tetapi juga dari dimensi kedalaman. Memasukkan dimensi kedalaman memiliki dampak yang luar biasa. Dengan melihat tanah sebagai bangunan tiga dimensi, maka kita tidak hanya menghargai tanah berdasarkan luasannya saja, tetapi juga berbagai sifat-sifat yang dimilikinya, baik sifat fisika, sifat kimia, maupun sifat biologinya. Sifat fisika dapat mencakup tekstur dan struktur tanah, agregasi tanah, kadar air tanah, konsistensi tanah, permeabilitas tanah, dan seterusnya. Sifat kimia dapat meliputi muatan listrik tanah, kapasitas jerap koloid tanah terhadap kation dan anion, reaksi tanah, potensial oksidasi dan reduksi, serta komposisi dan kandungan unsur hara di dalam tanah. Sifat biologi tanah dapat mencakup populasi dan aktivitas makroorganisme tanah seperti cacing tanah dan mikroorganisme tanah seperti jamur dan bakteri. Aktivitas biologi dapat juga diukur di antaranya dengan produksi CO₂ atau konsumsi O₂. Dalam beberapa hal, populasi dan aktivitas biologi tanah juga dapat diukur berdasarkan kotoran yang dikeluarkannya per satuan luas dan waktu. Misalnya, cacing tanah mengeluarkan kotoran dalam bentuk kasting yang jumlahnya sangat terkait dengan populasi dan aktivitasnya di dalam sistem tanah.

2.2 Pedon, Profil, dan Horizonisasi Tanah

Model pemahaman tanah sebagai bangunan tiga dimensi biasa digunakan oleh ahli pertanian dalam memahami berbagai sifat tanah untuk menyediakan unsur hara keperluan tanaman atau oleh ahli bangunan pada saat menggunakan tanah sebagai tempat berdirinya sebuah bangunan atau oleh ahli lingkungan dalam mengelola berbagai unsur toksik yang ada di atau masuk ke dalam sistem tanah, baik yang berasal dari dalam maupun dari luar sistem tanah, baik yang bersifat alami maupun antropogenik. Dengan menggunakan model ini, tanah dapat digambarkan dengan sebuah bangunan yang disebut **Pedon (Gambar 2.1)**. Pedon adalah bangunan tanah dengan panjang 1 m, lebar 1 m, dan kedalaman 1.5 m. Pedon dianggap cukup mewakili berbagai sifat tanah, sehingga dengan mempelajari sebuah pedon kita dapat memahami berbagai sifat suatu jenis tanah secara keseluruhan.



Gambar 2.1. Sebuah pedon tanah.

Walaupun secara umum tersusun oleh komponen yang sama (batuan masif dan pecahannya, kerikil, pasir, debu, dan liat), pedon dapat berbeda dari satu tempat ke tempat lainnya. Secara visual kita bisa menyaksikan dari warna

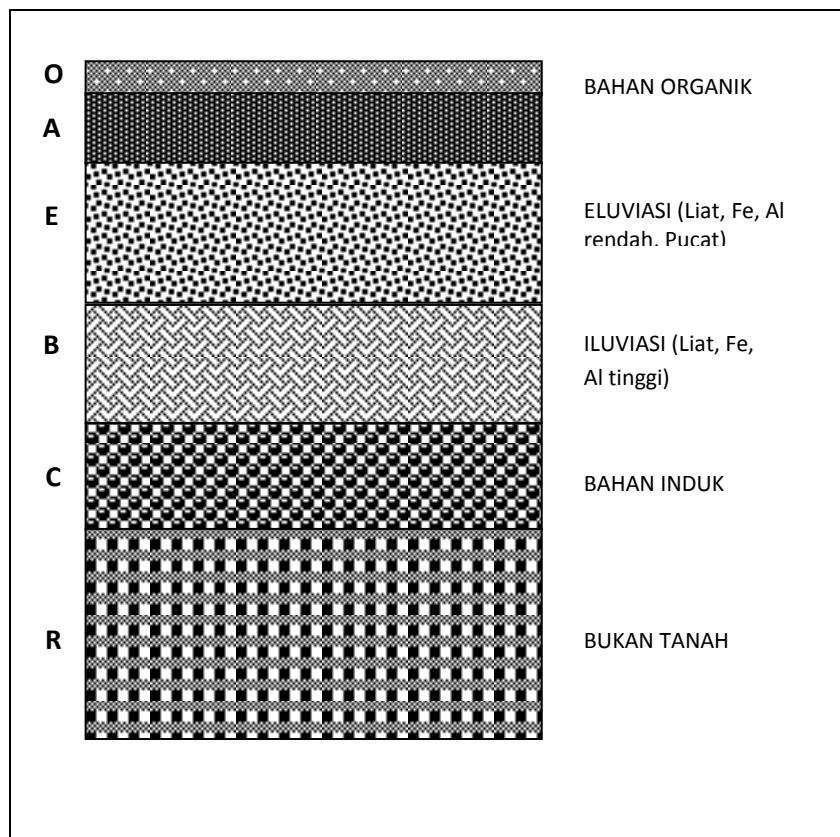
Abdul Kadir Salam – 2020

permukaannya bahwa sebagian tanah berwarna merah, sebagian lagi berwarna kuning, sebagian lagi berwarna hitam, dan seterusnya. Walaupun tidak selalu benar, perbedaan ini menunjukkan bahwa setiap tanah memiliki sifat yang berlainan satu dengan lainnya. Bila kita mengamati salah satu dinding pedon dengan membuat lubang 1 m panjang x 1 m lebar x 1.5 m kedalaman, maka dari profil dinding pedon (**Profil Tanah**) akan tampak lebih jelas lagi perbedaan antara suatu tanah dengan tanah lainnya. Sebagian akan menampakkan penyebaran warna yang hampir seragam pada seluruh profil tanah, sebagian lagi akan menampakkan horizonisasi, yang masing-masing menampakkan warna atau sifat tanah lainnya (misalnya tekstur dan/atau struktur tanah) yang khas untuk setiap horizon.

Secara umum profil tanah terdiri dari dua horizon utama, yaitu Horizon A dan Horizon B, yang duduk di atas batuan induk (Horizon C). Di bawah batuan induk biasanya terdapat Horizon R, yang merupakan batuan masif yang belum melapuk, yang merupakan tempat asal usul bahan induk tanah. Horizonisasi seperti ini dilukiskan secara skematik pada **Gambar 2.2**. Tanah yang telah berkembang lanjut memiliki seluruh horizon pada **Gambar 2.2** tersebut, sedangkan tanah muda yang belum berkembang memiliki horizon yang sangat terbatas, misalnya hanya Horizon A dan Horizon R saja. Karena Horizon C berkembang dari Horizon R, dan horizon-horizon di atasnya berkembang dari Horizon C, maka ada keterkaitan sifat antara berbagai horizon di dalam sebuah pedon. Dengan demikian, kedudukan bahan induk tanah menjadi faktor yang sangat penting terkait dengan berbagai sifat tanah yang berkembang.

Bila kita mencermati penampang melintang dari sebuah pedon, maka akan terlihat bahwa tanah berlapis-lapis dari lapisan atas ke lapisan di bawahnya. Secara umum, lapisan teratas biasanya berwarna gelap karena mengandung bahan organik yang cukup tinggi. Lapisan ini disebut **Horizon O**. Lapisan di bawahnya disebut **Horizon A** atau **Topsoil**. Lapisan ini berkembang dari lapisan di bawahnya. Di Horizon A terdapat lapisan yang sangat tercuci, yang disebut **Horizon Eluviasi** atau **Horizon E**. Di bawah Horizon E terdapat lapisan yang berwarna lebih pucat daripada Horizon A, yang merupakan tempat terjadinya akumulasi berbagai anasir yang berasal dari Horizon A. Lapisan ini disebut **Horizon B**. Umumnya orang menyebut lapisan ini sebagai **Subsoil**. Di dalamnya terdapat **Horizon I** yang merupakan lapisan tempat terakumulasinya anasir-anasir hasil pencucian dari Horizon A. Di bawah Horizon B terdapat sebuah lapisan yang terdiri dari pecahan-pecahan batuan, yang merupakan **Bahan Induk** tanah. Lapisan ini disebut **Horizon C**. Lapisan terbawah adalah batuan masif yang belum melapuk. Lapisan ini disebut **Horizon R**.

Ketebalan **Solum** (Horizon A dan Horizon B), yang menunjukkan tingkat perkembangan tanah, sangat menentukan tingkat kesuburan tanah. Semakin dangkal solum tanah umumnya semakin tidak subur dan semakin menghambat pertumbuhan tanaman serta menurunkan produksi tanaman. Yang dkk. (1996) melaporkan bahwa menurunnya ketebalan Horizon A tanah Alfisol (dengan berbagai ketebalan) dari 34 sampai 0 cm menurunkan tinggi tanaman, berat brangkasan atas dan berat kering akar tanaman kedelai. Dengan demikian, tanaman akan tumbuh dengan baik hanya pada tanah yang telah berkembang dengan baik.



Gambar 2.2. Horizonisasi tanah.

Dalam pemahaman yang lebih baru, kita melihat tanah tidak hanya sebagai bangunan tiga dimensi, tetapi merupakan bangunan empat dimensi. Selain memiliki dimensi panjang, lebar, dan dalam atau secara keseluruhan disebut dimensi ruang, tanah juga memiliki **dimensi keempat**, yaitu **Waktu**. Berbagai sifat fisika, kimia, dan biologi tanah tidak bersifat kekal, tetapi berubah dari waktu ke waktu. Sebagai contoh, tanah yang sebelumnya memiliki pH dan kandungan unsur hara relatif tinggi, dengan berjalannya waktu dapat mengalami degradasi yang disebabkan oleh pertanaman atau pencemaran. Misalnya, fenomena seperti ini dapat dilihat pada **Tabel 2.1**.

Tabel 2.1. Perubahan pH, kandungan C-Organik, N-Total, dan P-Tersedia tanah di lahan perkebunan singkong di Lampung Tengah*.

Lama Penggunaan (tahun)	pH	C-Organik (g kg ⁻¹)	N Total (g kg ⁻¹)	P-Tersedia (mg kg ⁻¹)
0**	4.7	43.0	2.60	5.03
1 - 5	4.5	20.0	1.00	24.7
6 - 10	4.4	12.8	0.80	7.70

*Diadaptasi dari Salam dkk. (1999e); **Belukar di dekat perkebunan

Tergantung pada tingkat perkembangan tanah, ketersediaan unsur hara di dalam tanah yang satu akan berbeda dengan di dalam tanah yang lainnya. Oleh sebab itulah, kita sering melihat pertumbuhan dan produksi tanaman yang sama lebih tinggi di suatu tempat tertentu dibandingkan dengan di tempat yang lain, walaupun sebenarnya iklim dan faktor penting lainnya sama. Dalam tanah yang telah tua, cadangan mineral yang merupakan sumber hara telah menipis sehingga tanah tersebut tidak dapat memasok unsur hara dalam jumlah yang dibutuhkan oleh tanaman. Sebaliknya, tanah yang masih muda masih memiliki berbagai mineral pemasok unsur hara, sehingga mampu menopang pertumbuhan dan produksi tanaman yang tinggi. Oleh karena itu pulalah, bila kita ingin memperbaiki pertumbuhan dan produksi tanaman di tanah tua kita harus menambahkan pupuk. Pupuk ini adalah pengganti mineral tanah yang memasok unsur hara di dalam tanah.

Diskusi di atas menunjukkan secara gamblang bahwa tanah merupakan suatu sistem bangunan empat dimensi yang sangat kompleks. Kompleksnya sistem tanah ini menyebabkan pengelolaan tanah untuk memperbaiki pertumbuhan dan produksi tanaman relatif sulit. Namun demikian, pengetahuan berkaitan dengan hubungan antara berbagai komponen di dalam sistem tanah akan sangat membantu kita untuk memahami apa yang terjadi dan bagaimana cara mengatasinya sehingga tanah dapat dimanfaatkan dengan baik untuk pertanian.

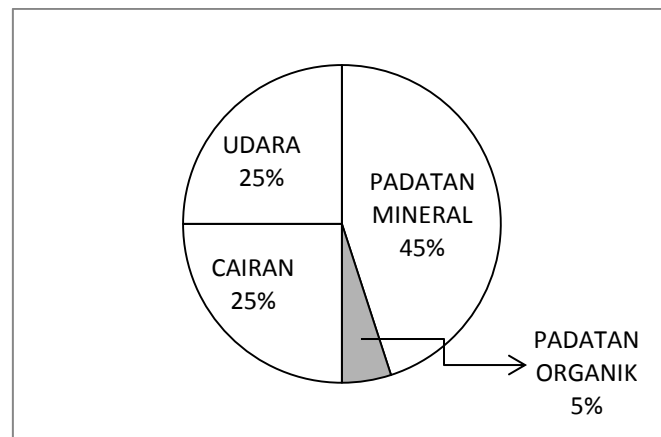
2.3 Komposisi Tanah

Secara umum tanah memiliki jenis komponen yang sama. Bila kita mengambil contoh tanah dari sebidang lahan, kita dapat melihat bahwa bangunan tanah sebenarnya terdiri dari empat komponen utama, yaitu: padatan, cairan, gas, dan mikroorganisme. Dalam keadaan ideal, padatan tanah mencakup sekitar 50% dari volume tanah sedangkan cairan dan gas tanah masing-masing mencakup 25% (**Gambar 2.3**). Dalam keadaan kering, air di dalam tanah sebenarnya tetap ada namun dengan persentase yang sangat rendah. Mikroorganisme tanah sebenarnya menempati volume yang dapat diabaikan, namun memiliki pengaruh yang sangat besar terhadap sifat fisika, kimia, dan biologi tanah sebagai akibat dari berbagai aktivitas yang dilakukannya di dalam tanah. Oleh karena itulah kita bisa membayangkan bahwa tanah adalah suatu “dunia” dengan mikroorganisme sebagai penghuninya. Penghuni dengan tempat yang dihuninya selalu berinteraksi sehingga mengakibatkan perubahan dinamis, baik pada penghuni maupun pada tempat yang dihuninya.

Komponen padatan tanah terdiri dari dua kelompok senyawa, yaitu: senyawa nir-organik berupa mineral tanah dan senyawa organik yang berasal dari berbagai bahan organik sisa tanaman, hewan, dan manusia. **Padatan mineral** di dalam tanah dapat berupa partikel berukuran kecil ($\leq 2\text{mm}$). Partikel-partikel nir-organik ini dapat saling bergabung dan diikat satu sama lain oleh partikel yang lebih halus (liat dengan ukuran diameter $\leq 2\mu\text{m}$), bahan organik, atau sesquioxida sehingga membentuk struktur tiga dimensi yang unik dan dapat berbeda bentuknya antara jenis tanah dan lapisan tanah.

Bila kita mengambil dan mengamati satu bongkah tanah dari topsoil atau subsoil, akan dengan mudah melihat bahwa tanah terdiri dari partikel dengan berbagai ukuran. Ukuran partikel tanah berkisar dari sangat halus sampai sangat

kasar. Secara umum, ilmuwan membagi ukuran partikel tanah ke dalam liat, debu, dan pasir. Liat adalah partikel tanah yang paling halus, dengan ukuran diameter $\leq 2\mu\text{m}$. Pasir adalah ukuran partikel tanah paling kasar, dengan ukuran diameter 0.05 – 2 mm, sedangkan debu adalah partikel tanah medium dengan ukuran diameter di antara pasir dan debu. Sebagian ilmuwan membagi-bagi lagi ukuran masing-masing kelas partikel ke dalam kategori halus, sedang, dan kasar, sehingga ada liat halus, liat sedang, dan liat kasar atau pasir halus, pasir sedang, dan pasir kasar.



Gambar 2.3. Komposisi ideal volume padatan, cairan, dan udara tanah (Hillel, 1980).

Partikel berukuran pasir dan debu tersusun oleh mineral primer, sedangkan partikel liat tersusun oleh mineral-mineral liat (mineral sekunder). Mineral primer adalah mineral yang belum mengalami perubahan dari struktur asli pada saat pembentukannya. Salah satu contoh mineral primer adalah **Feldspars**, yang banyak ditemui di kebanyakan tanah. Mineral sekunder adalah mineral baru yang merupakan hasil rekombinasi anasir-anasir hasil pelapukan mineral primer. Contoh mineral sekunder di antaranya adalah **Kaolinit** ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) dan **Montmorilonit** ($\text{Al}_2\text{Si}_2(\text{OH})_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$). Kaolinit telah ditunjukkan merupakan mineral liat paling sederhana hasil rekombinasi ion Al^{3+} dan $\text{Si}(\text{OH})_4$ yang dihasilkan dalam pelapukan Albit (**Reaksi 1.1**). Mineral ini tersusun atas unit-unit kristal yang terdiri dari satu

lembar Silika dan satu lembar Alumina, sehingga termasuk dalam kelompok **Mineral Liat Silikat Tipe 1:1**. Unit-unit kristal Montmorilonit terdiri atas satu lembar Alumina diapit oleh dua lembar Silika, sehingga masuk ke dalam kelompok **Mineral Liat Silikat Tipe 2:1**.

Mineral liat terdiri dari mineral liat silikat dan mineral liat nir-silikat. **Mineral Liat Silikat** mengandung Si di dalam strukturnya. Contohnya adalah Kaolinit. Sedangkan **Mineral Liat Nir-Silikat** tidak mengandung Si. Contoh mineral liat nir-silikat adalah oksida besi, di antaranya Hematit (Fe_2O_3), Gutit (FeOOH), Gipsit ($\text{Al}(\text{OH})_3$), dan Buhmit (AlOOH). Mineral-mineral ini disebut juga **Sesquioksida**.

Setiap jenis tanah memiliki komposisi ukuran partikel yang berbeda-beda. Sebagian tanah memiliki jumlah partikel pasir lebih banyak atau disebut tanah pasir atau tanah berpasir. Sebagian tanah memiliki jumlah liat lebih banyak atau disebut tanah liat atau tanah berliat. Sebagian lagi memiliki jumlah debu lebih banyak atau disebut tanah debu atau tanah berdebu. Komposisi ukuran partikel di dalam suatu jenis tanah disebut **Tekstur Tanah**. Tekstur tanah dapat ditentukan dengan menggunakan diagram yang disebut **Segitiga Tekstur** setelah komposisi masing-masing fraksi tanah ditentukan di laboratorium.

2.4 Struktur, Pori, dan Porositas Tanah

Partikel-partikel tanah (pasir, debu, dan liat) dapat bergabung menyusun bangunan tiga dimensi yang disebut **Agregat**. Dalam bangunan ini, pasir dan debu berperan sebagai kerangka sedangkan liat (silikat dan nir-silikat atau sesquioksida) ditambah dengan bahan organik berfungsi sebagai perekat. Bangunan tiga dimensi ini memiliki **Struktur Tanah** tertentu. Ada yang memiliki struktur bulat atau granular, sebagian lagi struktur pipih, sebagian lagi struktur prisma atau kubus, dan seterusnya.

Karena partikel tanah secara umum berbentuk bulat, maka ketika tersusun dalam sebuah agregat, penyusunan partikel-partikel tanah akan mengakibatkan terbentuknya ruang-ruang kosong di antara partikel tanah, yang disebut **Pori Tanah**. Sebagian pori tanah berukuran mikro, sebagian berukuran meso, dan sebagian berukuran makro, sehingga masing-masing membentuk pori mikro, pori meso, dan pori makro. Air dan udara di dalam tanah mengisi pori tanah; air biasanya mengisi pori mikro dan meso. Pada saat hujan atau setelah hujan air juga dapat mengisi pori makro walaupun sebagian akan mengalir secara vertikal akibat

gravitasi bumi. Udara tanah mengisi bagian dari pori tanah yang tidak diisi oleh air, khususnya pori makro dan pori meso.

Jumlah pori sangat penting bagi keseimbangan antara udara dan air bagi pertumbuhan tanaman; air diperlukan untuk bahan fotosintesis dan media pengangkutan unsur hara sedangkan udara khususnya oksigen diperlukan dalam proses respirasi akar tanaman dan mikroorganisme tanah. Volume total tanah yang merupakan pori tanah disebut **Porositas Tanah**. Dalam rangka mempertahankan porositas tanah yang cukup tinggi biasanya dilakukan dengan **Pengolahan Tanah**.

2.5 Air Tanah

Air tanah berada di dalam pori tanah. Dalam keadaan jenuh, seluruh pori tanah berisi air. Air mengisi pori mikro, pori meso, maupun pori makro. Air yang mengisi pori makro dalam keadaan jenuh akan meninggalkan pori akibat gaya gravitasi bumi dan menghasilkan **Air Gravitasi**. Proses ini akan mengosongkan pori makro dari air tanah dan menggantinya dengan udara tanah. Drainase pori makro dan, kemungkinan, air dalam pori meso ini akan berlangsung sampai kadar air tanah mencapai **Kapasitas Lapang (KL)**. Dalam keadaan kadar air kapasitas lapang, jumlah air dan udara secara ideal menempati volume tanah masing-masing sebesar 25%, yang merupakan kondisi ideal untuk pertumbuhan dan perkembangan tanaman.

Dalam keadaan sangat kering, air dalam pori meso dan pori mikro akan meninggalkan pori tanah namun menyisakan sejumlah air yang merupakan lapisan air di sekitar partikel tanah. Kadar air tanah pada saat sangat kering dan tanaman mengalami kelayuan permanen (tidak dapat balik) disebut Kadar Air **Titik Layu Permanen (TLP)**. Untuk menjaga pertumbuhan dan perkembangan tanaman dengan baik, kadar air tanah harus dijaga agar berada di atas TLP dan di sekitar KL. Selisih antara KL dan TLP disebut **Air Tersedia**.

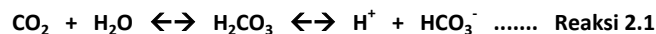
Baik TLP, KL, maupun Air Tersedia berbeda antarjenis tanah. Tanah pasir atau berpasir umumnya memiliki TLP, KL, dan Air Tersedia relatif rendah, sedangkan tanah liat atau berliat umumnya memiliki TLP, KL, dan Air Tersedia lebih tinggi. Tanah dengan kadar bahan organik tinggi juga memiliki TLP, KL, dan Air Tersedia lebih tinggi (Hillel, 1980).

2.6 Reaksi Kimia dan Biokimia Tanah

Di dalam tanah terjadi berbagai reaksi kimia dan biokimia yang penting bagi pengelolaan pertanian dan lingkungan. Di antara reaksi kimia yang terjadi di dalam tanah adalah pertukaran kation dan pertukaran anion atau pertukaran ion, reaksi asam-basa, dan reaksi hidrolisis. **Pertukaran Kation** adalah sebuah reaksi pertukaran antara kation yang diikat oleh koloid tanah dengan kation larut di dalam air tanah yang berbatasan langsung dengan koloid tanah. **Pertukaran Anion** merupakan reaksi yang sama dengan pertukaran kation, namun yang dipertukarkan adalah anion. Anion adalah ion yang bermuatan negatif, sedangkan kation adalah ion yang bermuatan positif. Contoh anion adalah NO_3^- dan SO_4^{2-} ; contoh kation adalah Cu^{2+} dan Zn^{2+} . Pertukaran kation atau anion atau disebut **Pertukaran Ion** memiliki sifat-sifat: stoikiometrik, dapat balik, dan dapat dimanipulasi secara kimia.

Reaksi pengasaman dan pembasaan adalah berbagai reaksi kimia yang dapat menurunkan atau menaikkan pH tanah. **Reaksi Pembasaan** yang terpenting dalam pertanian adalah **Pengapuran** (Kamprath, 1984; Thomas dan Hargrove, 1984). Bahan kapur yang ditambahkan ke dalam tanah akan bereaksi sedemikian rupa sehingga meningkatkan pH tanah. Misalnya, penambahan CaCO_3 ke dalam tanah akan mengakibatkan terurainya CaCO_3 menjadi ion Ca^{2+} dan ion CO_3^{2-} . Ion Ca^{2+} akan mengusir ion-ion H^+ dan Al^{3+} dari koloid tanah, sedangkan ion CO_3^{2-} akan bereaksi dengan air membentuk HCO_3^- dan menghasilkan ion OH^- . Ion OH^- akan menetralkan ion H^+ dan Al^{3+} menjadi air dan endapan $\text{Al}(\text{OH})_3$ sehingga mengakibatkan peningkatan pH.

Reaksi Pengasaman dapat terjadi misalnya karena meningkatnya konsentrasi CO_2 di dalam tanah, yang diemisikan oleh mikroorganisme dan akar tanaman. Untuk memperoleh energi, baik mikroorganisme maupun akar tanaman melakukan respirasi dan menghasilkan CO_2 . Di dalam air tanah, CO_2 yang diemisikan akan bereaksi dengan air dan menghasilkan ion H^+ sebagai berikut:



Meningkatnya konsentrasi ion H^+ melalui proses pengasaman di atas akhirnya menurunkan pH tanah. Proses ini sangat umum terjadi dalam Rizosfir. Yang dkk. (1996) melaporkan bahwa pH tanah di dalam Rizosfir tanah Alfisol yang ditanami kedelai lebih rendah daripada pH tanah non-rizosfir di sekitarnya dengan perbedaan antara 0.07 sampai 0.65 satuan pH.

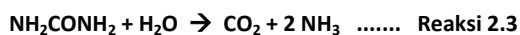
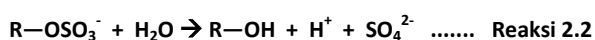
Selain itu, penyerapan kation oleh tanaman selalu diimbangi dengan ekskresi ion H^+ untuk menjaga kesetimbangan elektrostatis di dalam tanah. Proses ini dapat

Abdul Kadir Salam – 2020

menurunkan pH tanah, terutama di daerah perakaran (Tisdale dkk., 1985). Penambahan bahan asing berupa pupuk, misalnya Urea, juga dapat menurunkan pH tanah. Berbagai proses lain seperti hujan asam, pembuangan limbah asam ke dalam tanah, dekomposisi bahan organik, pencucian ion-ion basa, dan lain-lain dapat secara langsung atau tidak langsung meningkatkan keasaman tanah (Reddy dkk., 1991).

Hidrolisis adalah sebuah reaksi penguraian sebuah senyawa kimia dengan melibatkan air. Di dalam sistem tanah, air adalah pusat terjadinya berbagai reaksi kimia dan reaksi biokimia tanah. Berbagai reaksi kimia dan reaksi biokimia di dalam tanah bahkan melibatkan air sebagai salah satu reaktan. Sebagai contoh adalah pelapukan Albit pada **Reaksi 1.1**. Reaksi lain yang juga terjadi di dalam tanah dengan melibatkan air atau ion dan senyawa larut di dalam air tanah adalah reaksi pengasaman dan pembasaan, reaksi enzimatik, dan reaksi oksidasi-reduksi (redoks).

Salah satu reaksi enzimatik yang terjadi di dalam air tanah adalah proses dekomposisi P-organik, yang tidak dapat diserap oleh akar tanaman, menjadi P-nir-organik, yang dapat diserap oleh akar tanaman dalam bentuk ortofosfat primer ($\text{H}_2\text{PO}_4^{2-}$) dan/atau ortofosfat sekunder (HPO_4^{2-}) oleh enzim fosfatase pada **Reaksi 1.2** (Tabatabai, 1982). Selain itu, reaksi dekomposisi S-organik menjadi S-nir-organik dan reaksi hidrolisis Urea juga melibatkan air. Secara matematika, reaksi dekomposisi S-organik oleh **Arilsulfatase** dan penguraian Urea oleh **Urease** dapat digambarkan sebagai berikut (Tabatabai, 1982):



Dalam kedua reaksi di atas terlihat jelas bahwa reaksi biokimia tanah sangat tergantung pada air. Enzim tanah tidak akan mampu menguraikan P-organik dan S-organik tanpa kehadiran air tanah. Demikian juga, penguraian Urea tidak akan terjadi tanpa kehadiran air tanah.

Beberapa sifat kimia tanah sangat berpengaruh terhadap reaksi-reaksi kimia di atas. Di antaranya yang sangat penting dalam pertanian dan berkaitan secara langsung maupun tidak langsung dengan berbagai reaksi di atas adalah: pH, Kapasitas Tukar Kation (KTK), Kejenuhan Basa (KB), P-Tersedia, C-Organik dan Kandungan Bahan Organik, N-Total, dan Potensial Redoks (E). **Reaksi tanah (pH)** terkait dengan meningkatnya KTK padatan tanah tertentu dan juga proses pengendapan yang meningkat dengan meningkatnya pH. **KTK** terkait dengan

proses adsorpsi dan desorpsi kation. **KB** merupakan penjumlahan seluruh kation basa, sehingga sangat berkaitan dengan pH dan KTK tanah. **P-Tersedia** berkaitan dengan P di dalam tanah yang tersedia bagi tanaman. P-tersedia juga menunjukkan bagaimana keberadaan agen-agen pengendap ortofosfat seperti ion Al^{3+} , Mn^{2+} , dan Ca^{2+} . **Kandungan C-Organik** berkaitan dengan **Kandungan Bahan Organik**, umumnya kandungan bahan organik tanah adalah 1.7 kali C-organik tanah (Nelson dan Somner, 1982). **N-Total** tanah menunjukkan keseluruhan N di dalam tanah, baik dalam bentuk organik maupun nir-organik. Sifat tanah ini penting karena berkaitan dengan populasi mikroorganisme tanah. Umumnya populasi mikroorganisme tanah sebanding dengan N-total tanah, karena N merupakan bahan penting bagi mikroorganisme untuk menyusun protein. **Potensial redoks (E)** menunjukkan kondisi tanah apakah dalam keadaan reduktif atau oksidatif, yang berkaitan dengan penggenangan dan pengeringan. Potensial redoks sangat menentukan terjadinya proses oksidasi dan reduksi di dalam sistem tanah.

2.7 Biologi Tanah

Tanah merupakan bangunan tiga dimensi yang hidup dan bersifat dinamik. Hidup dan dinamikanya tanah diakibatkan oleh kehadiran kehidupan biologi di dalam tanah berupa mikroorganisme, makroorganisme tanah, dan akar tanaman. Telah dilaporkan bahwa di dalam tanah terdapat berbagai jenis mikroorganisme, yang secara umum dibagi menjadi kelompok Prokariot, yang tidak jelas termasuk flora atau fauna, dan kelompok Eukariot, yang mencakup flora dan fauna (Singer dan Munns, 1987). Yang termasuk **Prokariot** adalah Bakteri, Aktinomisetes, dan Ganggang Hijau Biru; sedangkan yang termasuk **Eukariot** adalah sebagian besar jamur dan protozoa. **Makroorganisme Tanah** di antaranya adalah cacing tanah, semut, tikus, dan marmut; sedangkan **Mikroorganisme Tanah** yang terpenting terdiri atas jamur dan bakteri.

Sebagian mikroorganisme tanah sangat bermanfaat bagi tanaman karena berperan dalam perombakan berbagai sisa tanaman dan hewan, salah satunya adalah yang dapat mempercepat perombakan bahan organik dengan menghasilkan enzim tanah. Dari perombakan bahan organik dibebaskan unsur hara yang diperlukan oleh tanaman. Mikroorganisme tanah yang bermanfaat umumnya banyak diteliti dan diisolasi untuk digunakan sebagai bahan **Pupuk Biologis**. Salah satunya adalah jamur yang bersimbiosis dengan akar tanaman yang disebut

Mikoriza. Sebagian dari mikroorganisme lain dapat berpengaruh buruk terhadap tanaman karena bersifat **Patogen**.

Makroorganisme tanah seperti cacing tanah, semut, tikus, dan marmut membuat lubang-lubang di dalam tanah sehingga meningkatkan porositas tanah dan meningkatkan kecepatan infiltrasi dan perkolasi air. **Cacing tanah** bahkan mencerna tanah dan bahan organik dan mengeluarkan hasil cernaannya dalam bentuk kasting, yang umumnya sangat subur. Keberadaan cacing tanah tidak hanya menghasilkan kasting, tetapi juga mencampurkan partikel-partikel tanah antar-lapisan tanah dan mempersuburnya dengan kasting. Lubang-lubang yang dibuat oleh cacing tanah juga bermanfaat dalam mengelola tanah dengan baik, yaitu meningkatkan proses infiltrasi dan perkolasi air karena lubang-lubang cacing tanah merupakan saluran yang berukuran cukup lebar dan panjang.

2.8 Kesuburan Tanah

Ada tanah subur dan ada tanah tidak subur. Di tanah yang subur kita tidak mengalami kesulitan saat menanam tanaman untuk tujuan tingkat produksi tertentu. Di tanah yang tidak subur, mengharapkan produksi optimum sama artinya dengan menyediakan berbagai persyaratan yang menuntut input tertentu, misalnya dalam bentuk masukan air dan pupuk.

Kesuburan tanah selalu berkaitan dengan berbagai sifat fisika, sifat kimia, dan sifat biologi tanah yang optimum untuk pertumbuhan dan perkembangan tanaman. **Tanah subur** memiliki sifat-sifat fisika yang baik mencakup: tekstur, struktur, porositas, kadar air tanah; sifat kimia yang baik mencakup pH, ketersediaan unsur hara makro dan unsur hara mikro, kandungan bahan organik, C-Organik dan N-Total tanah; dan juga sifat biologi yang baik mencakup: jenis, populasi dan aktivitas mikroorganisme tanah.

Sebagai contoh, tanah Mollisols merupakan tanah yang subur. Tanah ini merupakan tanah dengan bahan organik dan KB tinggi. Sedangkan tanah Oxisols adalah tanah yang tidak subur. Selain ber-pH rendah, tanah ini sudah tua dengan cadangan mineral dan unsur hara yang relatif rendah. Beberapa unsur hara yang dibebaskan dari mineral tanah di dalam tanah Mollisols jauh lebih tinggi dibandingkan dengan yang dibebaskan oleh tanah Oxisols (**Tabel 1-1**). Oleh karena itu, pengelolaan tanah Mollisols akan lebih mudah dibandingkan dengan Tanah Oxisols. Tingkat kesuburan tanah Oxisols tentunya dapat ditingkatkan dengan pengelolaan neraca hara dan sifat-sifat tanah dengan baik sesuai dengan kaidah-kaidah keilmuan tanah.

Abdul Kadir Salam – 2020

2.9 Pembentukan, Klasifikasi, dan Survey Tanah

Bila kita memperhatikan tanah di berbagai tempat, kita akan menyadari bahwa tanah berbeda dari satu tempat ke tempat yang lainnya. Dari sisi warna saja tanah akan berbeda-beda. Ada tanah yang berwarna merah, ada tanah yang berwarna kuning, ada tanah yang berwarna coklat, ada tanah yang berwarna hitam, dan seterusnya. Misalnya, warna tanah di Jabung Lampung Tengah cenderung coklat atau hitam, sedangkan di Kotabumi Lampung Utara cenderung ke arah kuning atau merah. Warna tanah di Pasar Minggu Jakarta adalah merah, sedangkan di Leuwiliang Bogor cenderung ke arah kuning. Warna tanah ini saja sudah cukup untuk menunjukkan bahwa tanah-tanah tersebut berbeda sifat dan kesuburannya. Misalnya, tanah yang berwarna hitam secara umum akan lebih subur daripada tanah yang berwarna merah. Tanah yang berwarna hitam umumnya mengandung banyak bahan organik, sedangkan tanah yang berwarna merah banyak memiliki oksida-oksida besi. Perbedaan ini sangat tergantung pada proses pembentukan yang dialami oleh masing-masing jenis tanah.

Pembentukan (Genesis) berbagai jenis tanah dengan berbagai sifatnya diatur oleh **Hukum Jenny**, yang secara matematika dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\text{Tanah} = f(\text{BI, I, R, O, T}) \dots\dots \text{Pers. 2.1}$$

dengan BI adalah Bahan Induk, I adalah Iklim, R adalah Relief, O adalah Organisme, dan T adalah Waktu. Persamaan ini menunjukkan bahwa sifat-sifat tanah yang terbentuk melalui proses genesis tanah sangat ditentukan oleh lima faktor utama tersebut.

Dengan menggunakan Hukum Jenny maka bila sekian banyak **Bahan Induk** yang terletak di berbagai jenis **Relief** dihadapkan dengan berbagai faktor **Iklim**, berbagai jenis dan perilaku **Organisme**, dengan berjalannya **Waktu** maka dapat disimpulkan akan terbentuk sekian banyak jenis tanah. Sebagian jenis tanah berbeda dengan jenis tanah lainnya. Sebagian lainnya, walau pun memiliki perbedaan, juga memiliki beberapa kesamaan.

Walaupun secara umum tersusun oleh komponen yang sama, tanah dapat berbeda dari satu tempat ke tempat lainnya. Seperti telah diungkapkan, secara visual kita bisa menyaksikan warna permukaan tanah berbeda-beda; sebagian tanah berwarna merah, sebagian lagi berwarna kuning, sebagian lagi berwarna hitam, dan seterusnya. Walaupun tidak selalu benar, perbedaan ini menunjukkan bahwa setiap tanah memiliki sifat yang berlainan satu dengan yang lainnya. Bila

Abdul Kadir Salam – 2020

kita menggali tanah dengan membuat lubang, dari profil tanah pada dinding lubang tersebut akan tampak lebih jelas lagi perbedaan antara satu tanah dengan tanah lainnya. Sebagian tanah menampakkan penyebaran warna yang hampir seragam pada seluruh profil tanah, sebagian lagi akan menampakkan horizonisasi, yang masing-masing menampakkan warna atau sifat lainnya yang bersifat khas untuk horizon tersebut.

Persamaan dan perbedaan sifat antara tanah mendorong pakar ilmu tanah untuk mengelompokkan tanah ke dalam berbagai satuan pengelompokan (**Klasifikasi Tanah**). Berdasarkan tingkat kesamaannya, tanah dikelompokkan ke dalam berbagai kelompok dengan menggunakan suatu sistem klasifikasi. Salah satu sistem klasifikasi tanah yang saat ini banyak digunakan adalah **Sistem Taksonomi Tanah**. Dalam Sistem Taksonomi Tanah, suatu jenis tanah dikelompokkan dalam berbagai tingkatan: **Order, Great Group, Group, Sub-Group, Family, dan Seri**. Pada saat ini, tanah di seluruh dunia dikelompokkan ke dalam 12 order: Entisols, Inceptisols, Aridisols, Mollisols, Vertisols, Spodosols, Alfisols, Ultisols, Oxisols, Histosols, Andisols, dan Gelisols. Menurut Buol dkk. (1989), saat ini terdapat 52 suborder dan 230-an *great group*. Sampai dengan tahun 1988 di Amerika Serikat saja telah dideskripsikan lebih dari 14.000 Seri Tanah (Singer dan Munns, 1987; Buol dkk.,1989).

Karena antara jenis tanah yang satu dengan jenis tanah yang lainnya memiliki perbedaan karakteristik dan sifat, penyebaran berbagai jenis tanah dalam suatu wilayah yang sangat luas sangat perlu untuk difahami dengan baik. Hal ini dimaksudkan untuk memudahkan pengelolaan tanah dan lahan di wilayah tersebut, khususnya terkait dengan karakteristik dan sifat masing-masing tanah. Untuk mendapatkan informasi seperti ini, perlu dilakukan sebuah usaha cerdas yang sistematis dan terencana dengan baik. Usaha ini merupakan kegiatan besar dan disebut **Survey Tanah**. Laporan hasil sebuah survey tanah, di antaranya berisi data penyebaran masing-masing jenis tanah dengan klasifikasinya, dapat digunakan oleh berbagai pihak untuk berbagai kepentingan menyangkut pengelolaan tanah dan lahan.

2.10 Degradasi dan Konservasi Tanah

Tanah merupakan sumberdaya tak terbarukan. Akibatnya, walaupun dibentuk melalui suatu proses puluhan, ratusan, dan bahkan ribuan tahun, tanah sangat rawan perusakan (**Degradasi Tanah**) sehingga tanah perlu dipelihara. Keilmuan dan teknologi untuk memelihara tanah telah berkembang dari waktu ke waktu.

Abdul Kadir Salam – 2020

Ilmu yang mempelajari cara-cara untuk memelihara atau mengawetkan tanah sehingga berbagai sifat fisika, kimia, dan biologinya tidak mengalami degradasi disebut **Konservasi Tanah**.

Secara umum, proses perusakan tanah dapat bersifat alami dan bersifat antropogenik (terkait dengan aktivitas manusia). Perusak alami yang terpenting di antaranya adalah: erosi dan pencucian; sedangkan perusak antropogenik adalah: pemadatan dan pencemaran oleh limbah industri. Erosi dan pencucian diakibatkan oleh curah hujan yang cukup tinggi dan banyak terjadi di negara dengan iklim basah seperti Indonesia. Curah hujan yang tinggi mengakibatkan air hujan masuk ke pori-pori tanah (**Infiltrasi**) dan bergerak di dalam tubuh tanah (**Perkolasi**) sehingga akhirnya mencapai air bawah tanah. Air perkolasi membawa serta berbagai ion dan senyawa yang larut di dalam air tanah (**Pencucian**). Curah hujan yang tinggi dan perkolasi yang berjalan relatif cepat akan secara cepat menguras berbagai unsur hara di dalam tubuh tanah, sehingga dengan cepat pula memiskinkan tanah.

Bila kecepatan perkolasi rendah dan karenanya Infiltrasi air terhambat, air akan tergenang di permukaan tanah. Bila genangan cukup banyak dan kelerengan lahan relatif tinggi maka akan terjadi **limpasan air (Run-off)**. Limpasan air yang cukup cepat akan mengakibatkan terkikisnya lapisan atas tanah (**Erosi**). Limpasan air dan erosi akan semakin cepat dengan meningkatnya kelerengan lahan. Oleh karena itu, tanah di lahan berlereng dengan curah hujan tinggi akan mengalami pemiskinan yang cukup cepat, karena sebagian besar unsur hara akan terbawa bersama dengan lapisan atas tanah yang terkikis oleh pergerakan air limpasan.

Penggunaan alat-alat berat dalam pertanian akan mengakibatkan menurunnya jumlah dan ukuran pori-pori tanah, sehingga mengakibatkan **Pemadatan (Compaction)**. Assouline dkk. (1997) melaporkan bahwa pemadatan dengan tekanan awal 50 menjadi 100 kPa meningkatkan kerapatan isi tanah secara tajam lebih dari dua kali lipat, dari 0.6 Mg m^{-3} menjadi 1.5 Mg m^{-3} . Karena menurunkan porositas tanah, pemadatan akan menurunkan kecepatan infiltrasi dan perkolasi air serta meningkatkan kerentanan tanah terhadap proses erosi. Dalam usaha menurunkan proses pencucian, pemadatan tanah sangat bermanfaat. Namun demikian, penurunan air yang masuk ke dalam tanah akan mengakibatkan meningkatnya genangan air. Proses ini akan merangsang meningkatnya limpasan air dan erosi.

Pencemaran oleh limbah industri akhir-akhir ini meningkat dengan pesat. Tergantung pada jumlah, sifat, dan cara penanganannya, limbah industri yang masuk ke dalam sistem tanah dapat mengakibatkan berbagai perubahan yang dapat merusak sifat fisika, kimia, dan biologi tanah. Misalnya, limbah industri yang bersifat asam dapat menurunkan pH tanah secara drastik. Karena merupakan

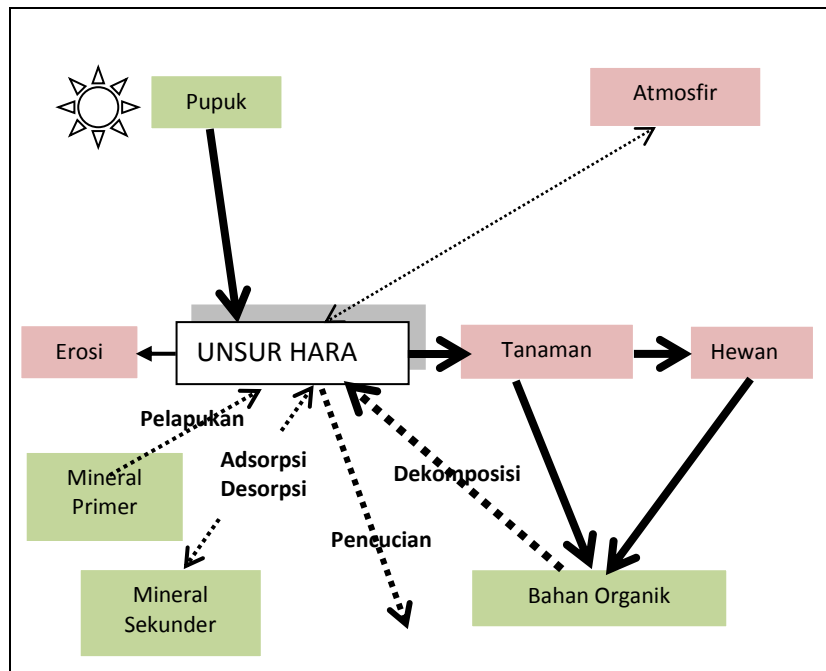
faktor pengatur utama, penurunan pH tanah akan mengubah berbagai sifat fisika, kimia, dan biologi tanah. Misalnya, penurunannya pH tanah dapat mengakibatkan kelarutan logam berat meningkat (Lindsay, 1979; Ma dan Lindsay, 1990; Workman dan Lindsay, 1990; El-Falaky dkk., 1991; Salam dan Helmke, 1998). Hal ini akan mengakibatkan pertumbuhan dan perkembangan tanaman terganggu karena sebagian tanaman rentan terhadap pH yang rendah dan konsentrasi logam berat yang tinggi. Penurunan pH tanah juga akan mengubah populasi dan aktivitas mikroorganisme. Karena lebih cocok dengan pH yang lebih rendah, populasi dan aktivitas jamur di dalam tanah akan meningkat dengan menurunnya pH tanah. Sebaliknya, dalam keadaan demikian, populasi dan aktivitas bakteri tertekan (Singer dan Munns, 1987; Harpstead dkk., 1988).

2.11 Pengelolaan Kesuburan Tanah dan Pemupukan

Pemanfaatan tanah untuk produksi tanaman terkait dengan neraca hara di dalam sistem tanah. Karena jumlah unsur hara di dalam tanah sangat terbatas, sedangkan kebutuhan tanaman relatif banyak, maka unsur hara di dalam tanah harus dikelola dengan baik, khususnya terkait dengan kesetimbangan antara unsur hara yang tersedia di dalam tanah dari sumber-sumber *in situ*, unsur hara yang masuk dari luar sistem tanah, dan unsur hara yang keluar dari sistem tanah akibat berbagai proses. Kondisi yang ideal adalah terjadinya **keseimbangan** antara jumlah unsur hara yang keluar dari sistem tanah dengan unsur hara yang tersedia asal sumber-sumber *in situ* di dalam tanah, yang dibebaskan melalui proses pelapukan mineral dan bahan organik, tanpa masukan unsur hara dari luar sistem tanah (**Gambar 2.4**).

Untuk tujuan tersebut, menganalisis berbagai proses pemasukan dan pengeluaran unsur hara ke dan dari sistem tanah merupakan langkah awal yang sangat baik. Secara umum beberapa proses pemasukan terpenting terdiri atas: Dekompleksasi, Desorpsi, Pelapukan atau Dekomposisi, Pelarutan, dan Deposisi Alami. Sedangkan proses pengeluaran terpenting dapat berupa: Serapan oleh Akar Tanaman, Kompleksasi, Adsorpsi, Penguapan, dan Pencucian. Di dalam tanah subur, neraca yang terjadi akan relatif seimbang. Sebaliknya di tanah yang tidak subur, jumlah unsur hara yang keluar dari sistem tanah akan lebih banyak daripada jumlah unsur hara yang tersedia di dalam sistem tanah. Akibatnya proses pemasukan *in situ* tidak dapat mengimbangi proses pengeluaran, sehingga diperlukan **Pemupukan** dalam jumlah yang cukup signifikan.

Abdul Kadir Salam – 2020



Gambar 2.4. Neraca hara di dalam sebuah sistem tanah – tanaman.

Daftar Pertanyaan Utama

1. Apakah yang dimaksud dengan tanah menurut pengertian kita dalam bidang ilmu pertanian?
2. Sebutkan empat komponen tanah dan jelaskan bagaimana seluruh komponen ini saling berkaitan dan berinteraksi!
3. Bagaimanakah signifikansi komponen mikroorganisme tanah?
4. Apakah yang dimaksud dengan Pedon? Gambarkan!
5. Gambarkan sebuah profil tanah dengan seluruh horizon utamanya! Uraikan secara singkat sifat dari masing-masing horizon tersebut!
6. Bagaimana pemahaman Saudara tentang tanah yang merupakan bangunan tiga dimensi?
7. Mengapa tanah juga disebut sebagai bangunan alam empat dimensi? Jelaskan!

8. Uraikan pemahaman Saudara tentang kadar air tanah dan batas-batas ketersediaannya terkait dengan Kapasitas Lapang dan Titik Layu Permanen!
9. Jelaskan reaksi-reaksi kimia tanah yang penting dalam bidang pertanian!
10. Jelaskan apa dan bagaimana kehidupan biologi di dalam sistem tanah! Apa dampaknya terhadap sifat-sifat tanah?
11. Apakah yang dimaksud dengan kesuburan tanah?
12. Apakah yang disebut dengan genesis tanah dan bagaimana hubungannya dengan lima faktor pembentuk tanah menurut Jenny?
13. Apakah yang disebut klasifikasi tanah dan manfaatnya? Apakah kaitannya dengan Sistem Taksonomi Tanah?
14. Apakah yang disebut Survey Tanah? Apa manfaatnya?
15. Jelaskan bagaimana hubungan antara curah hujan, infiltrasi, perkolasi, limpasan permukaan, dan erosi?
16. Jelaskan bagaimana proses erosi dapat menurunkan tingkat kesuburan tanah!
17. Jelaskan bagaimana proses pencucian dapat menurunkan tingkat kesuburan tanah!
18. Apakah yang disebut dengan Pemadatan Tanah? Bagaimana hubungannya dengan porositas tanah dan erosi? Bagaimana cara mengatasinya?
19. Jelaskan dampak yang terjadi pada tanah sebagai akibat dari terjadinya proses pencemaran antropogenik!
20. Jelaskan apa yang terjadi bila pH tanah turun sebagai akibat dari pencemaran antropogenik!

“..... dan Kami telah menghamparkan BUMI dan menjadikan padanya gunung-gunung dan kami tumbuhkan padanya segala sesuatu menurut ukuran” (QS Al-Hijr [15]:19)

Bab III:

PEMBENTUKAN SISTEM TANAH

3.1 Komposisi Fisika dan Kimia Tanah

3.2 Komposisi Mineral Tanah

3.3 Pelapukan Tanah

3.4 Perkembangan Horizon dan Sifat-Sifat Tanah

3.5 Hubungan Perkembangan Tanah dan Kesuburan Tanah

Daftar Pertanyaan Utama

3.1 Komposisi Fisika dan Kimia Tanah

Tanah adalah bangunan empat dimensi (panjang, lebar, dalam, dan waktu) yang terdiri dari empat komponen (padatan, cairan, gas, dan mikroorganisme). Dalam keadaan kesetimbangan yang ideal, padatan tanah terdiri dari padatan mineral (padatan nir-organik) dan padatan nir-mineral (padatan organik) yang mengisi 50% volume tanah, sedangkan cairan dan udara masing-masing mengisi 25% dari volume tanah. Padatan mineral terdiri dari partikel-partikel berukuran pasir, debu, dan liat dengan unsur penyusun utama Si, Al, dan O. Padatan nir-mineral atau padatan organik terdiri dari butiran-butiran halus yang tersusun oleh unsur C, H, dan O. Partikel-partikel pasir dan debu saling menyatu

Abdul Kadir Salam – 2020

direkat oleh partikel-partikel liat, bahan organik (humus), dan/atau sesquioxida membentuk agregat. Di dalam agregat terdapat pori tanah dengan berbagai ukuran yang diisi oleh air, udara, dan mikroorganisme tanah.

Karena ukuran dan sifat-sifatnya berbeda, partikel-partikel padatan tanah menunjukkan sifat dan perilaku yang berbeda pula. Pasir dan debu, yang masih berukuran kasar, merupakan sumber unsur hara yang terus melapuk karena masih mengandung mineral primer dalam jumlah yang signifikan. Liat dan humus, yang berukuran halus, menunjukkan elektronegativitas yang tinggi. Elektronegativitas liat dan humus, ditambah dengan ukurannya yang sangat halus, mengakibatkan kedua komponen tanah ini memiliki reaktivitas yang tinggi. Banyak reaksi terjadi di perbatasan antara padatan dan air tanah diatur oleh kedua komponen tanah ini, misalnya pertukaran kation dan pertukaran anion atau disebut juga pertukaran ion.

Berbagai sifat kimia dan reaksi kimia tanah berkaitan langsung dengan reaktivitas liat dan humus. Sifat tanah penting yang muncul darinya adalah kapasitas tukar kation (KTK), kejenuhan basa (KB), kejenuhan Al (KAl), serta selektivitas terhadap kation dan anion. Reaksi kimia penting yang berkaitan dengan kedua komponen tersebut adalah penjerapan kation dan anion, pertukaran kation dan anion atau pertukaran ion, pengikatan air, dan penjerapan spesifik.

Sebagai konsekuensi sifat empat dimensi dari tanah, khususnya terkait dengan dimensi waktu, tanah memiliki ruang yang berubah dari waktu ke waktu. Perubahan ini mencakup keempat komponen tanah, yaitu padatan, cairan, gas, dan mikroorganisme. Misalnya, padatan tanah akan berkembang semakin halus, sifat kimia tanah akan berubah lebih baik atau lebih buruk terkait dengan perannya dalam bidang pertanian dan lingkungan. Demikian juga, dengan dinamika yang lebih tinggi, perubahan juga akan terjadi pada sifat, komposisi, dan reaktivitas cairan dan gas. Jenis, populasi, dan aktivitas mikroorganisme tanah juga tentunya akan mengalami dinamika perubahan yang sangat cepat. Oleh karena itu, dimensi waktu harus dijadikan sebagai patokan dalam membahas data tentang tanah.

3.2 Komposisi Mineral Tanah

Tanah mineral umumnya tersusun terutama oleh padatan mineral (nir-organik) dan sedikit bahan nir-mineral (bahan organik). Ini berbeda dengan tanah organik, yang mengandung padatan nir-mineral (bahan organik) dalam jumlah banyak dan bahan mineral (nir-organik) dalam jumlah sedikit. Bahan mineral di dalam tanah mineral terdiri dari mineral-mineral primer dan mineral-mineral sekunder. **Mineral Abdul Kadir Salam – 2020**

Primer adalah mineral alami yang terdapat di dalam berbagai batuan induk yang belum mengalami proses pelapukan. Bahan induk tanah mineral terdiri dari tiga kelompok, yaitu batuan kristalin (batuan beku/*igneous rock*), batuan sedimenter, dan batuan deposit baru (Singer dan Munns, 1987; Harpstead dkk., 1988). **Batuan Kristalin** mencakup batuan granit, batuan gabro, dan batuan basaltik. **Batuan Kristalin** dinamakan kristalin karena di dalamnya terkandung berbagai mineral yang berbentuk kristal. **Batuan Granit** merupakan batuan asam ($\text{SiO}_2 > 66\%$) dan mengandung mineral **Kuarsa** dan **Feldspars** yang berwarna pucat. Tanah yang terbentuk dari batuan granit mengandung partikel dengan berbagai ukuran dari kerikil dan pasir sampai liat yang berukuran halus. Butiran kuarsa yang tampak seperti pecahan kaca dalam batu granit sangat tahan terhadap pelapukan sehingga menjadi butiran pasir di dalam tanah. Mineral lain di dalam batuan ini yang kurang tahan terhadap proses pelapukan adalah feldspars (berwarna pucat) dan mineral kalem yang kaya besi dan magnesium (**Feromagnesia**) dapat berubah melalui proses pelapukan menjadi partikel liat halus.

Batuan kristalin berwarna hitam atau kelabu tua mencakup **Batuan Gabro** (berbutiran kasar) dan **Batuan Basaltik** (berbutiran halus). Batuan ini mengandung mineral **Feromagnesia** (mengandung Fe dan Mg tinggi dan SiO_2 lebih rendah) dan feldspars yang berwarna gelap, biotit, dan muskovit. Karena batuan ini tidak mengandung kuarsa, tanah yang berasal dari batuan gabro dan batuan basaltik tidak berpasir tetapi berliat dan lengket serta agak merah dan subur.

Batuan sedimenter terdiri dari **Batuan Pasir** (*Sandstone*), **Batuan Lempung** (*Shale*), dan **Batuan Gamping** (*Limestone*) (Harpstead dkk., 1988). Batuan pasir mengandung akumulasi butiran kuarsa yang diikat menjadi satu; batuan lempung terdiri dari kuarsa berukuran liat dan debu plus feldspars, yang mengandung K, Fe, Mg, dan Ca; sedangkan batuan gamping mengandung butiran kapur. Tanah yang berkembang dari batuan pasir adalah berpasir dan yang berkembang dari batuan lempung dan batuan kapur berliat.

Di antara endapan baru yang terpenting untuk kondisi Indonesia adalah endapan abu vulkanik. Abu vulkanik menyebar di berbagai wilayah di Indonesia. Di antaranya yang sangat terkenal adalah yang disebabkan oleh letusan Gunung Krakatau di Selat Sunda, G. Galunggung di Jawa Barat, dan G. Merapi di Jawa Tengah – Jogjakarta (Simkin dan Fiske, 1983; Katili dan Sudrajat, 1984; Salam, 1995c). Kandungan mineral abu vulkanik sangat bervariasi, namun secara umum tanah yang berkembang dari abu vulkanik berkualitas sangat baik untuk produksi pertanian. Abu G. Merapi, misalnya, selain mengandung berbagai unsur basa seperti Ca, Mg, K, dan Na, juga mengandung P dalam jumlah yang relatif tinggi (Salam, 1995c). Beberapa penelitian juga menunjukkan hal yang sama dengan abu

volkanik yang berasal dari letusan G. Galunggung dan G. Krakatau (Simkin dan Fiske, 1983; Katili dan Sudrajat, 1984; Salam, 1995c).

Mineral sekunder merupakan hasil rekombinasi anasir-anasir hasil pelapukan mineral primer. Di antara mineral sekunder yang terpenting adalah **Mineral Liat**, yang terdiri dari **Mineral Liat Silikat** dan **Mineral Liat Nir-Silikat**. Mineral liat silikat tersusun oleh Si, Al, dan O; sedangkan mineral liat nir-silikat tidak mengandung Si di dalamnya. Contoh mineral liat silikat adalah Kaolinit, yang merupakan Mineral Liat Tipe 1:1 dan Montmorilonit, yang merupakan Mineral Liat Tipe 2:1; sedangkan contoh mineral liat bukan silikat adalah Gipsit ($\text{Al}(\text{OH})_3$) dan Hematit (Fe_2O_3).

Pada saat mineral primer mengalami pelapukan, terjadi pembebasan berbagai unsur dan anasir-anasir lain yang sebagiannya akan membentuk berbagai mineral sekunder. Sebagai contoh adalah pelapukan Albit atau Na-Feldspars (**Reaksi 1.1**). Dengan kehadiran air dan ion H^+ , mineral Albit mengalami pelapukan dengan membebaskan ion-ion Na^+ , Al^{3+} dan $\text{Si}(\text{OH})_4$. Dalam kehadiran $\text{Si}(\text{OH})_4$ yang tinggi, ion Al^{3+} dan $\text{Si}(\text{OH})_4$ akan bereaksi membentuk Kaolinit. Kaolinit bukanlah mineral yang stabil, sehingga di bawah temperatur dan curah hujan yang tinggi, pelapukan akan terus terjadi dan mengakibatkan penghancuran Kaolinit membentuk **Gipsit**. Beberapa mineral yang banyak ditemui di dalam tanah disajikan pada **Tabel 3.1**.

3.3 Pelapukan Tanah

Apakah tanah yang kita lihat di sekeliling kita terjadi dengan sendirinya? Bagaimana tanah terbentuk? Mengapa tanah berbeda dari satu tempat ke tempat lainnya, sehingga ada tanah yang subur dan ada juga tanah yang tidak subur? Mengapa sifat-sifat tanah berubah dari satu waktu ke waktu? Ini hanyalah beberapa pertanyaan yang akan dijawab dalam subbab ini, yang akan menggambarkan secara singkat bagaimana tanah terbentuk dan mengapa terdapat berbagai jenis tanah.

Tanah dengan berbagai jenisnya tidak terjadi dengan tiba-tiba tetapi melalui proses pembentukan (**Genesis**) selama ratusan bahkan ribuan tahun. Tanah yang terdapat di permukaan bumi pada saat ini berkembang dari hamparan batuan masif di permukaan bumi. Batuan ini dalam prosesnya secara terus menerus mengalami pelapukan fisika, kimia, dan biologis sehingga menjadi bagian yang lebih kecil dan terus mengecil selama proses pelapukan terjadi. Berbagai reaksi kimia turut serta menghancurkan batuan ini sehingga prosesnya akan berlangsung lebih cepat. Beberapa faktor lingkungan seperti curah hujan dan temperatur juga memengaruhi proses pembentukan tanah; di wilayah dengan curah hujan dan

Abdul Kadir Salam – 2020

temperatur rata-rata yang tinggi proses pembentukan tanah umumnya berlangsung sangat cepat. Selain itu, kehadiran berbagai jenis organisme juga turut mempercepat proses ini. Akibatnya, hamparan batuan di permukaan bumi lambat atau cepat pada akhirnya berkembang menjadi partikel yang berukuran halus. Bagian paling halus yang terdapat di permukaan bumi, yang merupakan hasil proses tersebut disebut **Tanah**. Di bagian bawahnya terdapat pecahan batuan yang memiliki sifat mirip dengan hamparan batuan tempat asal usul tanah, yang disebut **Bahan Induk**.

Tabel 3.1. Beberapa jenis mineral yang ditemui di dalam tanah.

No.	Nama Mineral	Rumus Kimia	Dominasi
1	Kuarsa	SiO ₂	Banyak dalam fraksi pasir dan fraksi debu
2	Feldspar	(Na,K)AlO ₂ [SiO ₂] ₃ CaAl ₂ O ₄ [SiO ₂] ₂	Banyak dalam tanah yang tidak tercuci berat
3	Mika	K ₂ Al ₂ O ₅ [Si ₂ O ₅] ₃ Al ₄ (OH) ₄ K ₂ Al ₂ O ₅ [Si ₂ O ₅] ₃ (Mg,Fe) ₆ (OH) ₄	Sumber K di sebagian besar tanah sub-tropika
4	Amfibol	(Ca,Na,K) _{2,3} (Mg,Fe,Al) ₅ (OH) ₂ [(Si,Al) ₄ O ₁₁] ₂	Mudah melapuk menjadi mineral liat dan oksida
5	Piroksin	(Ca,Mg,Fe,Ti,Al)(Si,Al)O ₃	Mudah melapuk
6	Olivin	(Mg,Fe) ₂ SiO ₄	Mudah melapuk
7	Epidot	Ca ₂ (Al,Fe) ₃ (OH)Si ₃ O ₁₂	Sangat resisten terhadap pelapukan kimia
8	Turmalin	NaMg ₃ Al ₆ B ₆ Si ₆ O ₂₇ (OH,F) ₄	
9	Zirkon	ZnSiO ₄	
10	Rutil	TiO ₂	Banyak dalam fraksi liat sebagai hasil pelapukan; Sumber kation dapat dipertukarkan dalam tanah; M = kation dalam RAL
11	Kaolinit	Si ₄ Al ₄ O ₁₀ (OH) ₈	
12	Smektit	M _x (Si,Al) ₈ (Al,Fe,Mg) ₄ O ₂₀ (OH) ₄	
13	Vermikulit		
14	Klorit		
15	Alofan	Si ₃ Al ₄ O ₁₂ ·nH ₂ O	Banyak di dalam tanah asal deposit abu vulkan
16	Imogilit	Si ₂ Al ₄ O ₁₀ ·5H ₂ O	
17	Gibsit	Al(OH) ₃	Banyak di dalam tanah tercuci
18	Gutit	FeOOH	Oksida besi terbanyak
19	Hematit	Fe ₂ O ₃	Banyak di daerah iklim panas
20	Ferihidrit	Fe ₁₀ O ₁₅ ·9H ₂ O	Banyak di horizon organik
21	Birnesit	(Na,Ca)Mn ₇ O ₁₄ ·28H ₂ O	Oksida mangan terbanyak
22	Kalsit	CaCO ₃	Karbonat terbanyak
23	Gypsum	CaSO ₄ ·2H ₂ O	Banyak di daerah iklim kering

*Diambil dari Sposito (1989)

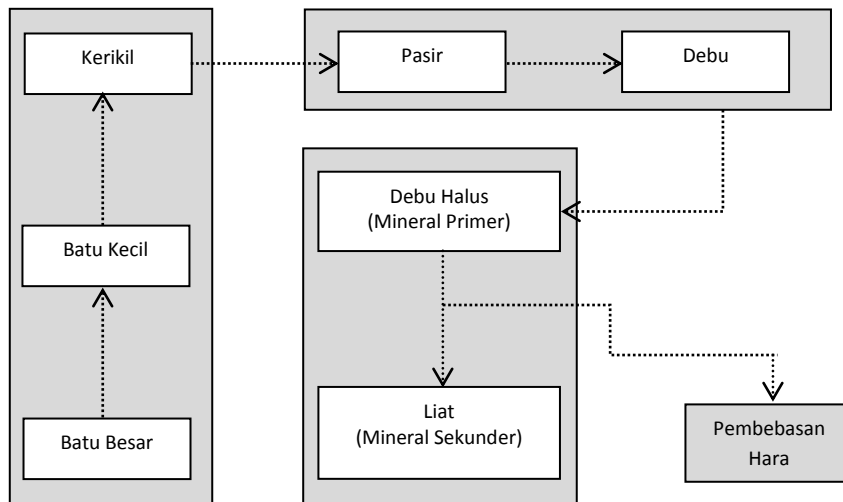
Pelapukan mineral adalah proses penghancuran mineral tanah menjadi komponen dan anasir-anasir yang lebih sederhana. Pelapukan terjadi karena ketidakseimbangan yang disebabkan mineral tanah memasuki lingkungan baru atau karena terjadinya perubahan tiba-tiba atau perlahan pada satu atau beberapa faktor lingkungan. Ketidakseimbangan yang terjadi akan mengakibatkan pergeseran reaksi yang mengarah pada dekomposisi penyusun mineral menjadi anasir-anasir yang lebih sederhana. Secara umum perjalanan proses pelapukan bahan induk sehingga akhirnya membentuk mineral liat dapat dilihat pada **Gambar 3.1** dan **Gambar 3.2**. Batuan besar akan mengalami berbagai proses fisika, kimia, dan biologis membentuk batuan dengan ukuran lebih kecil dan akhirnya membentuk tanah dengan kandungan mineral liat tinggi, baik liat silikat maupun liat nir-silikat.

Pelapukan mineral Albit (**Reaksi 1.1**, **Gambar 3.3**), seperti yang telah diungkapkan sebelumnya, menunjukkan bahwa mineral Albit sangat dipengaruhi oleh dua buah faktor lingkungan, yaitu kadar air dan pH tanah. Mineral Albit akan stabil dan tidak mengalami proses pelapukan bila kondisi kadar air dan pH tanah di sekitarnya tidak mengakibatkan perubahan konsentrasi ion Na^+ , Al^{3+} , dan $\text{Si}(\text{OH})_4$. Hasil pembentukan mineral sekunder dari anasir-anasir hasil pelapukan Albit sangat tergantung pada konsentrasi $\text{Si}(\text{OH})_4$. Bila konsentrasi $\text{Si}(\text{OH})_4$ tinggi, maka proses penuaan tanah terhambat, sehingga terbentuk Kaolinit. Sebaliknya, bila konsentrasi $\text{Si}(\text{OH})_4$ rendah, maka yang akan terbentuk adalah Gibsit. Dalam temperatur dan curah hujan yang tinggi, secara perlahan Kaolinit juga akhirnya akan melapuk membentuk Gibsit.

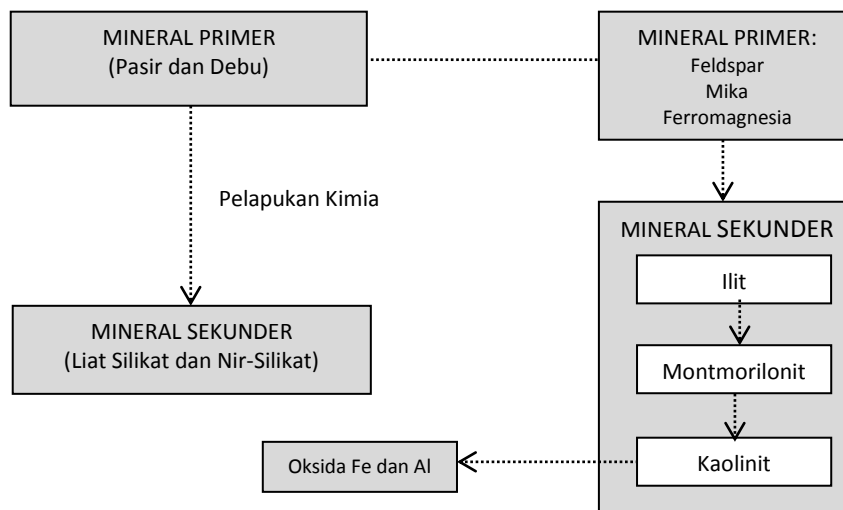
Kemungkinan urutan terjadinya mineral liat dapat diikuti pada **Gambar 3.2**. Bahan induk yang mengandung mineral-mineral primer seperti Feldspar, Mika, dan mineral Feromagnesia berkembang di bawah pengaruh berbagai faktor pembentuk tanah membentuk mineral sekunder dengan urutan Illit, Montmorilonit, Kaolinit, dan Oksida, Hidroksida, dan Hidroksioksida Fe dan Al.

Pelapukan Mineral dapat terjadi melalui tiga jenis proses, yaitu: pelapukan fisika, pelapukan kimia, dan pelapukan biologis. Ketiga jenis proses pelapukan ini umumnya terjadi secara simultan di dalam lingkungan. Proses yang satu berkaitan atau mengakibatkan atau menjadi akibat dari pelapukan yang lain. Sebagai misal, kegiatan cacing tanah dalam memanfaatkan bahan organik tanah, selain menghancurkan tanah secara fisika juga akan menghasilkan CO_2 di dalam tanah. Karbondioksida pada gilirannya akan bereaksi dengan air tanah dan menghasilkan ion H^+ dan HCO_3^- (**Reaksi 2.1**). Meningkatnya konsentrasi ion H^+ di dalam tanah akan mengakibatkan pelapukan kimia mineral tanah berjalan lebih cepat karena ion

H⁺ akan menjadi *Attacking Agent* (agen penyerang) yang kemudian menghancurkan mineral-mineral tanah.

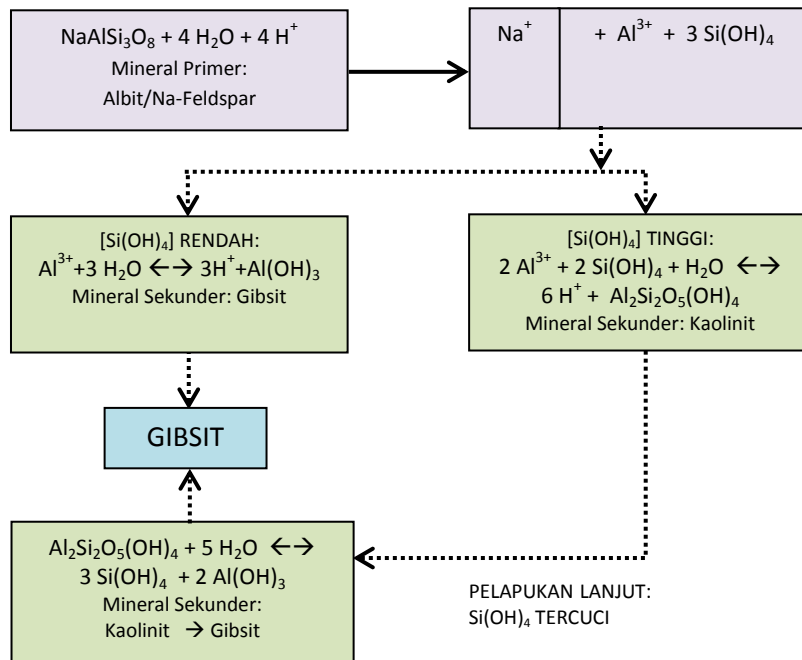


Gambar 3.1. Pelapukan batuan induk membentuk batuan dan senyawa yang lebih sederhana.



Gambar 3.2. Perombakan mineral primer menjadi mineral sekunder.

Abdul Kadir Salam – 2020



Gambar 3.3. Pelapukan mineral primer (Albit) membentuk mineral-mineral sekunder.

Kecepatan pelapukan mineral tanah dapat digambarkan secara matematika sebagai berikut (Bohn dkk., 1985):

$$\frac{\Delta(\text{Pelapukan})}{\Delta t} = f(\text{Bahan Induk, Iklim, Topografi, Biosfir}) \dots\dots \text{Pers. 3.1}$$

dengan Δ(Pelapukan) adalah jumlah mineral yang terlapuk dan Δt adalah rentang waktu pelapukan. Dengan memperhatikan faktor dominan yang paling memengaruhi, pelapukan Montmorilonit dapat digambarkan secara matematika sebagai berikut:

$$\frac{-\Delta(\text{Montmorilonit})}{\Delta t} = k [\text{H}^+] \dots\dots \text{Pers. 3.2}$$

dengan $\frac{-\Delta (\text{Montmorilonit})}{\Delta t}$ adalah **Kecepatan Pelapukan Montmorilonit**. Kecepatan pelapukan Montmorilonit tidak tergantung pada kuantitas Montmorilonit karena mineral ini tidak tahan terhadap proses pelapukan. Ini berbeda dengan pelapukan Kaolinit, mineral liat silikat yang lebih tahan terhadap pelapukan. **Kecepatan Pelapukan Kaolinit** dapat digambarkan secara matematika sebagai berikut (Bohn dkk., 1985):

$$\frac{-\Delta (\text{Kaolinit})}{\Delta t} = k [\text{Kaolinit}] [H^+] \dots\dots \text{Pers. 3.3}$$

Kecepatan pelapukan Montmorilonit maupun Kaolinit keduanya sangat tergantung pada pH tanah. Seperti telah diungkapkan sebelumnya, pelapukan kedua mineral ini akan semakin cepat dengan menurunnya pH tanah atau meningkatnya konsentrasi ion H^+ (**Tabel 1.1**). Dengan demikian, kecepatan pelapukan tanah sangat tergantung pada komposisi mineral, struktur mineral, ukuran partikel, dan komposisi mineral, dan juga berbagai faktor lingkungan, misalnya pH tanah.

a. Pelapukan Fisika

Pelapukan tanah secara fisika selalu berlangsung di dalam sistem tanah. Pelapukan fisika mengakibatkan bongkahan atau butiran yang besar terpecah-pecah menjadi butiran-butiran yang lebih kecil. Berkurangnya ukuran butiran padatan tanah menjadi lebih kecil mengakibatkan semakin luasnya permukaan butiran, sehingga lebih mudah untuk dilapuk lebih lanjut, termasuk melalui proses pelapukan kimia dan pelapukan biologis.

Di antara tenaga penghancur yang dikenal sangat dahsyat dalam pelapukan fisika adalah **gerakan air dan angin**. Gerakan air dari ketinggian yang jatuh menimpa batu secara perlahan akan menggerus batuan. Gerakan air yang deras akan memecah butiran-butiran besar menjadi butiran-butiran yang lebih kecil. Gerakan angin juga dapat membawa serta butiran-butiran kasar dan memecahnya menjadi butiran-butiran yang lebih kecil. Proses pemecahan butiran-butiran besar menjadi butiran-butiran yang lebih kecil akan semakin intensif bila bidang-bidang lemah pada butiran-butiran besar lebih banyak. Semakin rapuh bahan mineral penyusun butiran-butiran besar akan semakin mudah butiran tersebut dihancurkan menjadi butiran-butiran yang lebih kecil.

Perubahan **temperatur** juga dapat menyebabkan terjadinya pelapukan fisika. Di wilayah beriklim dingin, pengaruh perubahan temperatur dapat terjadi sangat

dahsyat. Air dapat mengisi pori-pori batuan. Karena volume air membesar pada saat membeku, maka penurunan temperatur dapat mengakibatkan air di dalam pori-pori batuan mengembang dan mengakibatkan retak atau pecahnya batuan. Di wilayah beriklim panas seperti di Indonesia, pengaruh temperatur juga dapat mempercepat pemecahan batuan secara fisika karena mineral penyusun batuan memiliki daya muai yang berbeda dan dapat mengakibatkan percepatan penghancuran mineral di dalam tanah.

Selain itu, **kekuatan antropogenik** juga sangat memengaruhi terjadinya pelapukan fisika, khususnya pada era modern. Berbagai kegiatan manusia dengan menggunakan peralatan-peralatan dengan kekuatan fisika tinggi dapat mempercepat pemecahan batuan menjadi berukuran lebih halus. Sebagai contoh adalah penggunaan traktor di lahan perkebunan. Pengolahan tanah, khususnya pengolahan tanah dalam, dapat secara fisika memecah butiran-butiran tanah yang berukuran besar menjadi butiran-butiran yang lebih kecil. Banyak sekali aktivitas antropogenik lainnya yang juga dapat mengakibatkan terjadinya proses pelapukan fisika berjalan lebih cepat.

Tenaga biologis yang diakibatkan oleh perkembangan akar tanaman dan aktivitas makroorganisme tanah juga merupakan kekuatan yang dapat mengakibatkan terjadinya pelapukan fisika. Pertumbuhan akar tanaman di antara partikel-partikel tanah dapat menimbulkan kekuatan yang mengakibatkan partikel-partikel tanah terpecah menjadi butiran-butiran yang lebih kecil. Demikian juga aktivitas makroorganisme tanah, seperti cacing tanah, tikus, dan marmut, yang juga dapat mengakibatkan mengecilnya ukuran partikel tanah. Cacing tanah bahkan mencerna partikel-partikel tanah bersama dengan bahan organik dan mengeluarkannya dalam bentuk kasting, yang tentu dengan butiran partikel tanah yang telah mengecil.

b. Pelapukan Kimia

Pelapukan kimia juga berlangsung di dalam tanah. Pelapukan kimia bahkan lebih besar peranannya dibandingkan dengan pelapukan jenis lainnya. Pelapukan kimia mengakibatkan struktur mineral di dalam tanah terdekomposisi menjadi anasir-anasir yang lebih sederhana berupa senyawa-senyawa atau ion-ion bebas. Anasir-anasir ini dapat kembali bereaksi membentuk senyawa semula atau membentuk senyawa lain yang sama sekali baru.

Keberlangsungan proses pelapukan kimia dikontrol oleh sebuah konstanta kesetimbangan. Dalam contoh yang telah diungkapkan sebelumnya, yaitu

Abdul Kadir Salam – 2020

pelapukan kimia Albit (**Reaksi 1.1**), **Konstanta Keseimbangan** yang mengaturnya dapat dituliskan secara matematika sebagai berikut:

$$K = \frac{[Na^+][Al^{3+}][Si(OH)_4]}{[H^+]^4} \dots\dots \text{Pers. 3.4}$$

Nilai K dapat dihitung dengan menggunakan data-data termodinamika yang dapat diperoleh dari *Handbook of Chemistry* atau diperoleh dari sumber yang sama.

Terjadinya pelapukan mineral dapat dilihat dari hasil kali konsentrasi spesies yang terlibat di dalam reaksi yang bersangkutan. Bila hasil kali konsentrasinya lebih rendah daripada nilai K maka akan terjadi proses pelapukan kimia. Secara matematika hal ini dapat dituliskan sebagai berikut:

Bila $K > \frac{[Na^+][Al^{3+}][Si(OH)_4]}{[H^+]^4}$, maka pelapukan kimia terjadi atau terus berlangsung. Namun sebaliknya, bila $K < \frac{[Na^+][Al^{3+}][Si(OH)_4]}{[H^+]^4}$, maka pelapukan kimia tidak akan terjadi.

Dengan menggunakan logika ini, maka proses pelapukan kimia mineral tanah dapat dipercepat atau pun dihambat. Bila kita ingin **mempercepat pelapukan kimia** Albit (**Reaksi 1.1**), maka dapat dilakukan beberapa hal, yaitu:

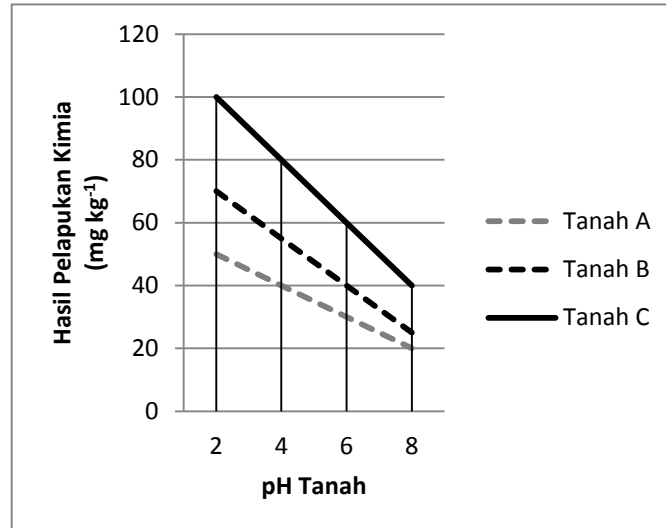
1. meningkatkan kadar air tanah,
2. menurunkan pH tanah,
3. menurunkan konsentrasi Na^+ di dalam air tanah,
4. menurunkan konsentrasi Al^{3+} di dalam air tanah, dan/atau
5. menurunkan konsentrasi $Si(OH)_4$ di dalam air tanah.

Sebaliknya, bila kita ingin **menghambat pelapukan Albit**, maka dapat dilakukan hal-hal sebagai berikut:

1. menurunkan kadar air tanah,
2. menaikkan pH tanah,
3. menaikkan konsentrasi Na^+ di dalam air tanah,
4. menaikkan konsentrasi Al^{3+} di dalam air tanah, dan/atau
5. menaikkan konsentrasi $Si(OH)_4$ di dalam air tanah.

Secara umum logika semacam ini dapat digunakan juga untuk mengelola pelapukan kimia berbagai mineral di dalam sistem tanah. Untuk mempercepat pelapukan kimia mineral tanah, kita dapat meningkatkan konsentrasi reaktan dan/atau menguras produk. Sebagai contoh, dari berbagai penelitian diketahui bahwa pelapukan kimia akan berlangsung cepat dengan menurunkan pH tanah atau meningkatkan konsentrasi ion H^+ , yang merupakan reaktan (**Gambar 3.4**).

Sebaliknya, bila kita ingin menghambat reaksi, kita harus menurunkan konsentrasi reaktan dan membiarkan konsentrasi produk di dalam air tanah tetap tinggi.



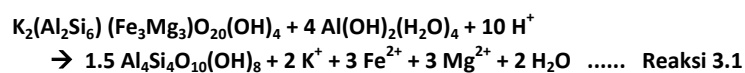
Gambar 3.4. Peningkatan pelapukan kimia dengan meningkatkan $[H^+]$.

Pada dasarnya, pelapukan kimia mineral tanah terjadi karena adanya proses penyeimbangan terhadap kehilangan kation dan silikat dengan melibatkan dua agen pelapuk, yaitu: (1) proton atau ion H^+ dan (2) elektron. **Proton** menggantikan kation dan logam dari beberapa posisi di dalam struktur mineral. Kation dan logam kemudian dibebaskan dan melarut ke dalam air tanah. Proses ini adalah yang lebih umum terjadi dalam lingkungan tanah. Sedangkan **Elektron** dibebaskan oleh komponen mineral yang dapat dioksidasi dalam keadaan oksidatif. Proses ini kemudian membuat mineral tanah lebih rentan terhadap proses pelapukan oleh ion H^+ . Dengan demikian, mineral tanah selalu bergerak menuju keseimbangan yang mencakup keseimbangan massa dan keseimbangan muatan (listrik). Keseimbangan ini dapat diubah dengan pencucian produk pelapukan, yang kemudian dapat merangsang terjadinya proses pelapukan lebih lanjut.

Pergantian Na, K, Ca, dan Mg oleh ion H^+ dalam struktur mineral memulai proses pelapukan mineral tanah. Mineral tanah mengonsumsi ion H^+ dan

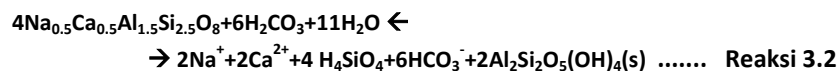
membebaskan kation tersebut ke dalam air tanah. Misalnya, dalam pelapukan Mika, ion H⁺ dari air tanah menggantikan ion K⁺ dalam Ruang Antar Lapisan. Ion K⁺ kemudian dibebaskan ke dalam air tanah sedangkan ion H⁺ masuk ke posisi oktahedral dan tetrahedral menggantikan kedudukan kation multivalen. Pengekstrakan kation multivalen dapat dipercepat oleh kehadiran agen pengelat yang berada di dalam air tanah. **Pelarutan Asam** seperti ini adalah mekanisme utama yang melapuk mineral silikat.

Misalnya, dalam keadaan asam, 10 ion H⁺ dapat menghancurkan sebuah molekul Biotit menghasilkan 1.5 molekul Kaolinit. Beberapa kation seperti K⁺, Fe²⁺, dan Mg²⁺ melarut dan kemudian dapat diendapkan kembali dalam bentuk mineral sekunder. Reaksi ini dapat digambarkan sebagai berikut (Stumm dan Morgan, 1981):



Asam organik yang memiliki berat molekul rendah dengan gugus OH dan COOH, seperti Asam Sitrik dan Asam Oksalik, cenderung membentuk kompleks logam-organik yang larut dengan logam asal struktur mineral seperti Mg²⁺ dan Fe²⁺. Proses ini kemudian mempercepat proses pelapukan.

Selain pelarutan asam, kation dalam struktur mineral silikat primer juga dapat digantikan oleh ion H⁺ yang berasal dari H₂CO₃ (**Reaksi 2-1**) di dalam air tanah dengan proses yang disebut **Karbonasi**. Muatan yang dibebaskan oleh mineral kemudian dinetralisasi oleh ion HCO₃⁻. Sebagai contoh, reaksi ini terjadi dalam pelapukan Plagioklas (Andesin) yang menghasilkan Kaolinit dengan membebaskan Na⁺, Ca²⁺, dan HCO₃⁻ (Stumm dan Morgan, 1981).



Pelapukan mineral juga dapat terjadi dengan proses **Hidrolisis**, yang mengakibatkan pergantian dengan proton yang berasal dari air. Air sebenarnya bersifat netral, namun muatannya terdistribusi membentuk molekul dipolar. Muatan dipolar ini mengakibatkan air dapat menghidrolisis, yang merupakan salah satu proses terpenting dalam pelapukan mineral tanah. Di antara mineral yang mudah dihidrolisis adalah Olivin dan Piroksin, sedangkan yang tahan terhadap proses ini adalah Kuarsa, Zirkon, Magnetit, dan Titanit, termasuk juga di dalamnya adalah mineral liat, sedangkan keterlapukan Feldspar adalah sedang.

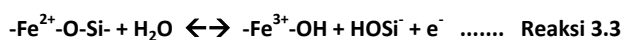
Abdul Kadir Salam – 2020

Air adalah sebuah reaktan yang dapat berpartisipasi dalam banyak proses pelapukan dan dapat bertindak sebagai pelarut. Dalam hal ini kedudukan air tanah menjadi penting karena: (1) dapat berpartisipasi dalam berbagai proses pelapukan mineral, (2) mengandung bahan terlarut seperti asam karbonat dan asam organik, (3) dapat menghasilkan kondisi reduktif, dan (4) dapat mengangkut dan menyebarkan berbagai bahan ke seluruh tubuh tanah. Dengan demikian, air dapat memperlambat atau mempercepat proses pelapukan mineral tanah.

Proses pelapukan oleh ion H^+ juga dapat terjadi dengan pertukaran kontak. Dalam proses ini kation yang diikat oleh partikel mineral ditukar secara langsung dengan ion H^+ yang dikeluarkan oleh akar tanaman tanpa perantara air tanah. Dengan cara ini, kation dapat dibebaskan dari mineral yang berada di wilayah yang dipengaruhi oleh permukaan akar tanaman. Pertukaran kation juga merupakan proses penting dalam proses pelapukan mineral. Dalam proses ini, kesetimbangan akan terganggu bila kation yang kemudian larut dipindahkan. Pengurangan kation larut ini akan mengakibatkan pertukaran lebih lanjut.

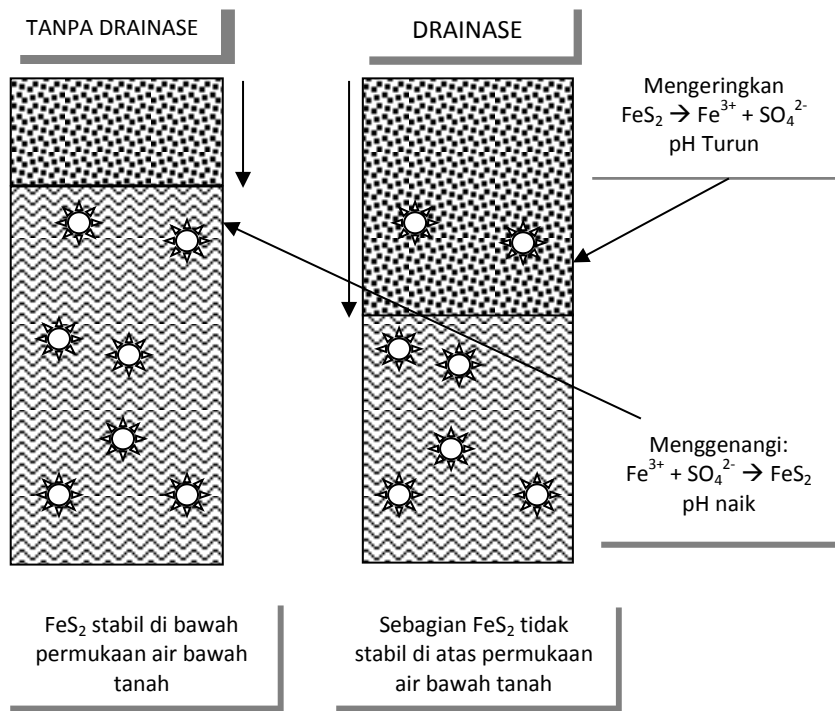
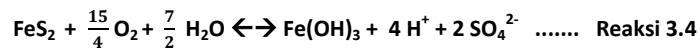
Reaksi oksidasi dan reduksi atau secara ringkas biasa disebut **Reaksi Redoks** terjadi pada mineral yang mengandung unsur-unsur yang dapat berubah bilangan oksidasinya bila terjadi perubahan potensial redoks (E). Misalnya, mineral yang mengandung unsur Fe dan/atau Mn. Bilangan oksidasi Fe bisa berubah dari Fe^{2+} pada E lebih rendah menjadi Fe^{3+} pada E lebih tinggi dan sebaliknya; atau unsur Mn yang bilangan oksidasinya berubah dari Mn^{2+} pada E rendah menjadi Mn^{4+} pada E tinggi, dan sebaliknya. Perubahan bilangan oksidasi seperti ini akan mengakibatkan pelapukan kimia di dalam sistem tanah. Reaksi reduksi-oksidasi juga umumnya melibatkan mikroorganisme tanah (Silver dkk., 1986).

Mineral silikat yang mengandung Fe dan Mn seperti Olivin, Amfibol, dan Piroksin mudah terlapuk dengan cara ini sebab kedua unsur tersebut mudah teroksidasi dalam keadaan oksidatif. Dalam proses ini, Fe^{2+} dari mineral silikat akan dibebaskan melalui reaksi sebagai berikut:



Dalam reaksi ini O_2 bertindak sebagai akseptor elektron. Kelarutan Fe^{3+} dalam pH normal rendah sehingga Fe^{3+} akan membentuk oksida atau hidroksida yang tidak larut, di antaranya yang banyak ditemui adalah Gutit ($FeOOH$). Dalam proses ini, kadar air secara tidak langsung memengaruhi proses pelapukan yang melibatkan reaksi Redoks, terutama berkaitan dengan ketersediaan O_2 , yang diperlukan dalam reaksi oksidasi.

Salah satu contoh pelapukan kimia dengan melibatkan reaksi redoks adalah **pelapukan mineral pirit (FeS₂) (Reaksi 3.4)** yang banyak terdapat di tanah gambut sulfat masam. Pirit di dalam tanah gambut bersifat stabil, karena tanah gambut berada dalam keadaan reduktif atau E rendah sebagai akibat dari terhambatnya difusi O₂ dari atmosfer menuju mineral pirit (**Gambar 3.5**). Bila tanah gambut didrainase (permukaan air bawah tanah diturunkan), sehingga mineral pirit menjadi tidak tergenang, maka tanah berubah dari sebelumnya bersifat reduktif (E rendah) menjadi oksidatif (E tinggi) sebagai akibat tidak terhalangnya difusi O₂ dari atmosfer. Perubahan ini akan memicu terjadinya reaksi redoks sebagai berikut (Nordstrom, 1982; Thomas dan Hargrove, 1984):



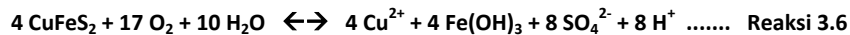
Gambar 3.5. Pelapukan pirit dalam kondisi oksidatif.

Unsur Fe yang sebelumnya di dalam mineral pirit berbilangan oksidasi +2 teroksidasi menjadi unsur Fe dengan bilangan oksidasi +3 dalam bentuk ion Fe^{3+} . Dengan kehadiran O_2 , FeS_2 melapuk menjadi ion Fe^{3+} dan ion SO_4^{2-} . Proses pelapukan ini dapat secara tajam menurunkan pH tanah.

Perkembangan **tanah sulfat masam** (*cat clay*) pada dasarnya berlangsung melalui dua tahap: (1) fase reduksi, yang menghasilkan pH tinggi dan pirit (FeS_2) setelah terjadinya reduksi besi dan sulfat dan (2) fase oksidasi, yang melarutkan pirit dan mengasamkan tanah. Beberapa kondisi yang diperlukan untuk fase pertama adalah: (1) sumber Fe^{3+} dan SO_4^{2-} , (2) kondisi reduktif ($E < -300$ mV), (3) kehadiran bakteri pereduksi sulfat (misalnya *Desulfovibrio spp*), (4) sumber energi untuk mikroorganismenya, dan (5) mekanisme yang dapat mengangkut HCO_3^- yang terbentuk. Reduksi Fe^{3+} melarutkan unsur ini dalam air tanah sehingga memudahkan reaksinya dengan sulfida (S^{2-}), yang merupakan hasil reduksi SO_4^{2-} (**Reaksi 3.5**).



Contoh lain dari pelapukan kimia dengan melibatkan reaksi oksidasi reduksi adalah pelapukan Kalkopirit (CuFeS_2), yang melepaskan ion bebas Cu^{2+} , yang merupakan salah satu unsur hara mikro bagi tanaman. Reaksi pelapukan tersebut dapat digambarkan secara matematika dalam **Reaksi 3.6**:



Umumnya, apa pun bentuk Cu dalam mineral primer akan dibebaskan dalam bentuk ion bebas Cu^{2+} melalui proses pelapukan. Selama air tanah dalam keadaan oksidatif dan tidak alkalin, maka ion Cu^{2+} tidak akan mengendap. Semakin rendah nilai pH akan semakin tinggi konsentrasi ion bebas Cu^{2+} .

Pelapukan kimia adalah sebuah proses penting yang akhirnya mengubah unsur yang menjadi bagian struktural mineral tanah, yang tidak tersedia bagi tanaman, menjadi ion bebas atau ion kompleks, yang tersedia bagi tanaman. Dengan demikian kedudukan pelapukan kimia sangat penting dalam menyediakan unsur hara bagi tanaman dari sumber alami berupa mineral-mineral tanah. Beberapa contoh pelapukan kimia disajikan pada **Tabel 3.2**.

Pelapukan kimia dipengaruhi oleh beberapa faktor penting. Pelapukan kimia umumnya meningkat dengan peningkatan luas permukaan reaktif, yang berarti dengan semakin halusnya ukuran partikel mineral. Oleh karena itu, proses pelapukan kimia akan terlebih dahulu menghancurkan partikel-partikel yang lebih

halus, baru kemudian partikel-partikel yang lebih kasar. Sebuah laporan menunjukkan bahwa fraksi liat membebaskan lebih banyak Na dan K daripada fraksi debu dan fraksi pasir (Mortland dan Lawton, 1961). Liat mengandung 30-74%, debu 24-56%, dan pasir 3-31% dari total K yang dibebaskan oleh ketiga fraksi tanah tersebut. Penghalusan mineral meningkatkan KTK Kaolinit sehingga meningkatkan kompleks jerapan untuk mengikat kation hasil pelapukan.

Seperti telah diungkapkan pada **Gambar 3.4**, kecepatan pelapukan kimia juga dipengaruhi oleh pH tanah. Hal ini karena ion H^+ merupakan agen pelapuk yang dapat menggantikan kedudukan kation dalam struktur mineral. Ion H^+ juga dapat menetralkan ion OH^- yang dihasilkan dalam proses hidrolisis dan menjaga pH tanah tetap pada tingkat yang dapat merangsang pelapukan mineral tanah. Secara umum, pelapukan mineral tanah akan semakin cepat dengan peningkatan konsentrasi ion H^+ di dalam tanah. Akibatnya, setiap proses yang dapat memengaruhi perubahan pH tanah dapat memengaruhi pelapukan mineral tanah.

Kehadiran agen pengelat di dalam air tanah juga meningkatkan pelapukan mineral tanah. Proses pelapukan mineral meningkat dengan kehadiran Asam Sitrat, Asam Oksalat, dan agen pengelat lain. Hal ini terjadi karena pertukaran ion H^+ langsung dari agen pengelat dengan kation di dalam struktur mineral yang menghasilkan kompleks kation-pengelut organik, yang larut dan mudah diserap oleh akar tanaman atau tercuci oleh air. Keefektifan asam organik dalam mempercepat proses pelapukan kimia mengikuti urutan sebagai berikut (Tan, 1986):

**Sitrik = Oksalik > Salisilik > Protokatekuik = Galik > *p*-Hidroksibenzoik > Vanilik > Kafeik
..... Pers. 3.5**

Selain asam-asam ini, bahan organik dengan gugus COOH dan Fenolik serta Asam Humik dan Asam Fulvik juga dapat melakukan fungsi ini.

c. Pelapukan Biologis

Pelapukan biologis juga berlangsung di dalam tanah, umumnya terkait dengan kehadiran akar tanaman dan makro-mikroorganisme tanah. Secara definisi pelapukan biologis sebenarnya merupakan kombinasi antara pelapukan fisika dan pelapukan kimia. Pelapukan fisika diakibatkan oleh gaya mekanik yang diakibatkan oleh pertumbuhan atau aktivitas biologis sedangkan pelapukan kimia diakibatkan oleh senyawa-senyawa kimia atau biokimia yang diproduksi oleh akar tanaman dan/atau makro-mikroorganisme di dalam tanah.

Abdul Kadir Salam – 2020

Tabel 3.2. Beberapa contoh pelapukan kimia.

No.	Reaksi Kimia	Mineral Reaktan/Produk
1	$\text{SiO}_2(\text{s}) + 2 \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{H}_4\text{SiO}_4$	Kuarsa \rightarrow
2	$\text{CaCO}_3(\text{s}) + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{Ca}^{2+} + \text{HCO}_3^- + \text{OH}^-$	Kalsit \rightarrow
3	$\text{CaCO}_3(\text{s}) + \text{H}_2\text{CO}_3 \leftrightarrow \text{Ca}^{2+} + 2 \text{HCO}_3^-$	Kalsit \rightarrow
4	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}(\text{s}) + 2 \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow 2 \text{Al}(\text{OH})_4^- + 2\text{H}^+$	Gibsit \rightarrow
5	$\text{Mg}_2\text{SiO}_4(\text{s}) + 4 \text{H}_2\text{CO}_3 \leftrightarrow 2 \text{Mg}^{2+} + 4 \text{HCO}_3^- + \text{H}_4\text{SiO}_4$	Forsterit \rightarrow
6	$\text{Fe}_2\text{SiO}_4(\text{s}) + \text{H}_2\text{CO}_3 \leftrightarrow 2 \text{Fe}^{2+} + 4 \text{HCO}_3^- + \text{H}_4\text{SiO}_4$	Fayalit \rightarrow
7	$\text{Mg}_6\text{Si}_8\text{O}_{20}(\text{OH})_4(\text{s}) + 12 \text{H}^+ + 8 \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow 6 \text{Mg}^{2+} + 8 \text{H}_4\text{SiO}_4$	Talk \rightarrow
8	$\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4(\text{s}) + 6 \text{H}^+ \leftrightarrow 3 \text{Mg}^{2+} + 2 \text{H}_4\text{SiO}_4 + \text{H}_2\text{O}$	Talk \rightarrow
9	$\text{MgCO}_3(\text{s}) + 2\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{HCO}_3^- + \text{Mg}(\text{OH})_2(\text{s}) + \text{H}^+$	Magnesit \rightarrow Brusit
10	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4(\text{s}) + 5 \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow 2 \text{H}_4\text{SiO}_4 + \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}(\text{s})$	Kaolinit \rightarrow Gibsit
11	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8(\text{s}) + \frac{11}{2} \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{Na}^+ + \text{OH}^- + 2 \text{H}_4\text{SiO}_4 + \frac{1}{2} \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4(\text{s})$	Albit \rightarrow Kaolinit
12	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8(\text{s}) + \frac{9}{2} \text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{CO}_3 \leftrightarrow \text{Na}^+ + \text{HCO}_3^- + 2 \text{H}_4\text{SiO}_4 + \frac{1}{2} \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4(\text{s})$	Albit \rightarrow Kaolinit
13	$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8(\text{s}) + 3 \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{Ca}^{2+} + 2 \text{OH}^- + \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4(\text{s})$	Anortit \rightarrow Kaolinit
14	$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8(\text{s}) + 3 \text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{CO}_3 \leftrightarrow \text{Ca}^{2+} + 2 \text{HCO}_3^- + \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4(\text{s})$	Anortit \rightarrow Kaolinit
15	$4 \text{Na}_{0.5}\text{Ca}_{0.5}\text{Al}_{1.5}\text{Si}_{2.5}\text{O}_8 + 6 \text{H}_2\text{CO}_3 + 11 \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow 2 \text{Na}^+ + 2 \text{Ca}^{2+} + 4 \text{H}_4\text{SiO}_4 + 6 \text{HCO}_3^- + 2 \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4(\text{s})$	Plagioklas (Andesin) \rightarrow Kaolinit
16	$5 \text{KAlSi}_3\text{O}_8(\text{s}) + 2 \text{H}_2\text{CO}_3 + 12 \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow 2 \text{K}^+ + 2 \text{HCO}_3^- + 6 \text{H}_4\text{SiO}_4 + \text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2(\text{s})$	K-Feldspar (Ortoklas) \rightarrow Mika
17	$7 \text{NaAlSi}_3\text{O}_8(\text{s}) + 6 \text{H}^+ + 20 \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow 6 \text{Na}^+ + 10 \text{H}_4\text{SiO}_4 + 3 \text{Na}_{0.33}\text{Al}_{2.33}\text{Si}_{3.67}\text{O}_{10}(\text{OH})_2(\text{s})$	Albit \rightarrow Na-Montmorilonit
18	$\text{KMg}_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2(\text{s}) + 7 \text{H}_2\text{CO}_3 + \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{K}^+ + 3 \text{Mg}^{2+} + 7 \text{HCO}_3^- + 2 \text{H}_4\text{SiO}_4 + \frac{1}{2} \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4(\text{s})$	Biotit \rightarrow Kaolinit
19	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}(\text{s}) + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{Ca}_3(\text{PO}_4)_3(\text{OH})(\text{s}) + \text{F}^- + \text{H}^+$	Fluorapatit \rightarrow Hidroksiapatit
20	$\text{KAlSi}_3\text{O}_8(\text{s}) + \text{Na}^+ \leftrightarrow \text{K}^+ + \text{NaAlSi}_3\text{O}_8(\text{s})$	Ortoklas \rightarrow Albit
21	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2(\text{s}) + \text{Ca}^{2+} \leftrightarrow \text{Mg}^{2+} + 2 \text{CaCO}_3(\text{s})$	Dolomit \rightarrow Kalsit
22	$\text{MnS}(\text{s}) + 4 \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{Mn}^{2+} + \text{SO}_4^{2-} + 8 \text{H}^+ + 8\text{e}^-$	Mangan Sulfida \rightarrow
23	$3 \text{Fe}_2\text{O}_3(\text{s}) + 4 \text{H}_2\text{O} + 2 \text{e}^- \leftrightarrow 2 \text{Fe}_3\text{O}_4(\text{s}) + 8 \text{H}^+ + 2 \text{OH}^-$	Hematit \rightarrow Magnetit
24	$\text{FeS}_2(\text{s}) + \frac{15}{4} \text{O}_2 + \frac{7}{2} \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{Fe}(\text{OH})_3(\text{s}) + 4 \text{H}^+ + 2 \text{SO}_4^{2-}$	Pirit \rightarrow Besi Oksida
25	$\text{PbS}(\text{s}) + 4 \text{Mn}_3\text{O}_4(\text{s}) + 12 \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{Pb}^{2+} + \text{SO}_4^{2-} + 12 \text{Mn}^{2+} + 24 \text{OH}^-$	Galena \rightarrow

Diadaptasi dari Garrels dan Christ (1965); Lindsay (1979); Stumm dan Morgan (1981)

Tenaga mekanik yang dihasilkan dapat berupa tekanan fisika yang diakibatkan oleh bertumbuhnya akar tanaman. Tekanan ini dapat mengakibatkan retaknya batuan-batuan yang besar sehingga terpecah menjadi butiran-butiran yang lebih kecil. Tergantung pada jenis tanamannya, tekanan ini dapat bersifat sangat masif dan mengakibatkan pelapukan secara dahsyat. Tenaga mekanik ini juga dapat diakibatkan oleh aktivitas cacing tanah, yang menghancurkan butiran-butiran tanah dan mencernanya sehingga menjadi butiran-butiran yang lebih halus. Tenaga ini juga dapat diakibatkan oleh aktivitas makroorganisme lain seperti semut, tikus, dan marmut.

Senyawa kimia dan biokimia yang diproduksi oleh akar tanaman dan organisme tanah dapat berupa ion H^+ , ion OH^- , ion HCO_3^- , asam-asam organik, dan enzim tanah (Huang dkk., 2014; Montiel-Rozas dkk., 2016; Cabugao dkk., 2017). Ion H^+ diekskresikan oleh akar tanaman pada saat menyerap kation dari sekitar akar, sedangkan ion OH^- dan ion HCO_3^- dikeluarkan oleh akar tanaman pada saat menyerap anion seperti $H_2PO_4^-$ dan NO_3^- dari sekitar akar tanaman. Sedangkan asam-asam organik dan enzim dikeluarkan oleh akar tanaman dan makro-mikroorganisme untuk mempercepat dekomposisi bahan organik tanah, untuk memanfaatkan energi dan/atau unsur hara yang dikandungnya.

Ion H^+ yang dikeluarkan oleh akar tanaman umumnya lebih banyak daripada ion OH^- dan HCO_3^- , sehingga ekskresi akar tanaman dapat menurunkan pH tanah. Seperti telah diungkapkan, ion H^+ adalah *Attacking Agent*, sehingga penurunan pH tanah akan mengakibatkan lebih cepatnya proses pelapukan kimia (**Gambar 3.4**). Penalaran yang sama akan berlaku bila akar tanaman mengekskresikan banyak asam-asam organik, karena asam organik akan menurunkan pH tanah.

Baik akar tanaman, makroorganisme (misalnya cacing tanah), maupun mikroorganisme tanah mengeluarkan senyawa biokimia dalam bentuk enzim. Dua di antara enzim yang dihasilkan dan penting dalam pertanian adalah fosfatase dan urease. Fosfatase merupakan enzim yang terkait dengan penyediaan P bagi tanaman dari sumber P-organik. **Fosfatase** mempercepat perubahan P-organik, yang tidak tersedia bagi tanaman karena tidak dapat diserap, menjadi ortofosfat primer ($H_2PO_4^-$) dan ortofosfat sekunder (HPO_4^{2-}), yang tersedia karena dapat diserap oleh akar tanaman (**Reaksi 1.2**). Fosfatase berperan mengatalisasi **Reaksi 1.2**, sehingga proses perubahan P-organik menjadi P nir-organik dipercepat. Dengan demikian, kehadiran fosfatase di dalam tanah sangat menguntungkan petani, karena dapat membantu penyediaan unsur hara P dari sumber organik.

Tidak semua enzim menguntungkan ditinjau dari sisi pertanian. Salah satu contohnya adalah **Urease**. Urease mempercepat reaksi hidrolisis Urea dengan reaksi sebagaimana digambarkan sebelumnya pada **Reaksi 2.3**. Kehadiran Urease

mengakibatkan urea yang diterapkan ke dalam tanah secara cepat mengalami hidrolisis menjadi **Amoniak**, dan sebagian hilang menjadi N_2 melalui proses penguapan (**Volatilisasi**). Kehilangan N akibat dekomposisi urea yang relatif cepat di tanah pertanian merupakan salah satu masalah yang sangat serius. Selain mengakibatkan ketidakefisienan pemberian N untuk tanaman, kehilangan ini juga dapat mengakibatkan pencemaran lingkungan oleh N. Oleh karena itu, kehadiran Urease di dalam tanah pertanian harus dikurangi atau reaksinya ditekan sehingga tidak memboroskan penggunaan pupuk Urea.

Untuk menekan reaktivitas urease di dalam tanah telah dikembangkan berbagai cara, salah satunya adalah dengan mengembangkan senyawa penghambat Urease. Senyawa yang dapat menekan aktivitas Urease disebut **Urease Inhibitor**. Pengembangan **Slow-Release Urea** juga dimaksudkan untuk mengurangi kehilangan N dengan menghambat pelarutan urea, sehingga produksi NH_3 dari hidrolisis urea terhambat (Fan dan Li, 2010). **Slow-Release Urea** dibuat dengan kondensasi urea dan formaldehida. Telah dilaporkan pula bahwa volatilisasi amoniak dapat ditekan juga salah satunya dengan penerapan *Sprinkler Irrigation* (Holcomb dkk., 2011).

Penjelasan di atas menunjukkan bahwa pelapukan biologis adalah kombinasi antara pelapukan fisika dengan pelapukan kimia. Kehadiran makhluk hidup dalam reaksi-reaksi di atas mendorong orang menyebutnya sebagai pelapukan biologis.

3.4 Perkembangan Horizon dan Sifat-Sifat Tanah

Bahan induk tanah tidak hanya berasal dari batuan yang terdiri atas berbagai senyawa nir-organik, tetapi juga terdiri atas bahan organik yang berasal dari sisa-sisa makhluk hidup. Proses fisika, kimia, dan biologis bekerja merombak kedua jenis bahan ini di dalam tubuh tanah sehingga menghasilkan horizonisasi seperti terlihat pada profil tanah bila kita membuat lubang dengan menggali tanah. Jumlah dan sifat horizon pada setiap jenis tanah sangat beragam tergantung pada jenis dan sifat bahan induk serta derajat faktor yang memengaruhinya. Dalam bab ini dibahas hanya contoh yang sangat umum terdapat di wilayah hutan tropika dengan curah hujan tinggi sebagai model untuk mempelajari morfologi tanah. Susunan horizon tersebut secara skematik disajikan pada **Gambar 3.6**.

Bagian berisi humus yang berwarna gelap sebagai akibat pengaruh masukan dari organisme umumnya terakumulasi di tanah bagian atas (**Topsoil**), yang disebut Horizon A. Di bawah horizon ini terdapat suatu lapisan yang sangat dipengaruhi

oleh proses pencucian dahsyat akibat gerakan air secara vertikal di dalam profil tanah (perkolasi). Lapisan ini disebut Horizon E, yang berasal dari kata *eluvial*, yang berarti tercuci. Tanah lapisan bawah (Horizon B) biasanya merupakan wilayah akumulasi fraksi liat tanah. Beberapa unsur hara yang diperlukan oleh tanaman sebenarnya juga ikut tercuci oleh air perkolasi, namun sebagian akan diikat oleh fraksi liat dan humus di lapisan atas, sehingga pada waktunya dapat dimanfaatkan oleh tanaman.



Gambar 3.6. Horizonisasi pada profil tanah tropika.

Proses pelapukan terus berkembang di Horizon A dan Horizon B atau horizon-horizon di bawahnya, sehingga akan menyebabkan tanah terus berkembang. Semakin tua tanah kemungkinan akan mengandung liat dalam jumlah yang semakin banyak sebab fraksi liat tanah adalah hasil dari pelapukan fraksi yang lebih kasar. Pelapukan di Horizon C (batuan induk) dan Horizon R (batuan masif) secara bertahap mengubah batuan induk menjadi tanah dan batuan masif menjadi bahan induk dan seterusnya. Kecepatan pelapukan tanah dan perkembangan profil tanah

tergantung pada derajat pengaruh berbagai faktor pembentukan tanah yang akan dibahas dalam submateri berikutnya.

Pelapukan tanah juga mengakibatkan perubahan-perubahan lain, di antaranya adalah perubahan sifat tanah yang mencakup sifat fisika, sifat kimia, dan sifat biologi tanah. Oleh karena itu tanah bersifat dinamis, berubah dari waktu ke waktu. Tanah akan berubah dari suatu jenis tanah dengan sebuah nama yang mengandung seperangkat sifat tertentu menjadi sebuah tanah lain dengan sebuah nama lain yang mengusung seperangkat sifat tertentu, yang sebagian atau seluruhnya sangat berlainan. Perubahan sifat ini dari sisi pertanian dapat menguntungkan (misalnya karena nilai KTK dan KB meningkat), namun dapat juga merugikan (misalnya KAI meningkat serta pH menurun).

Perubahan ini juga dapat diatur supaya berlangsung lebih cepat atau lebih lambat. Pengaturan ini dapat dimaksudkan untuk memelihara kesuburan tanah atau mempercepat tercapainya status tanah subur dengan memenuhi kriteria tanah subur. Pengaturannya dapat dilakukan dengan mengelola berbagai faktor yang memengaruhi pembentukan tanah atau disebut Faktor Pembentukan Tanah.

a. Faktor Pembentukan Tanah

Menurut banyak ahli tanah, proses pembentukan tanah dipengaruhi oleh berbagai faktor yang dapat dibagi menjadi lima kelompok. Kelompok tersebut adalah (1) bahan induk, (2) iklim, (3) relief, (4) organisme, dan (5) waktu. Kelima faktor ini bekerja sama mempercepat proses pelapukan berbagai bahan mineral dan bahan organik menjadi bahan yang lebih sederhana dengan melepaskan anasir-anasir penyusunnya. Sebagian anasir-anasir ini akan dimanfaatkan oleh tanaman atau tercuci oleh air perkolasi; sebagian lagi akan mengalami rekombinasi membentuk mineral sekunder. Oleh karena itu, pelapukan bahan induk akan dipercepat di bawah pengaruh iklim, relief, dan organisme.

Bahan Induk. Bahan induk adalah bahan dasar berupa batuan masif yang berisi berbagai mineral primer yang merupakan asal usul tanah. Melalui proses pelapukan yang panjang, bahan induk akan berkembang menghasilkan tanah yang memiliki sifat-sifat yang sangat berkorelasi dengan sifat-sifat bahan induk asalnya. Ini sesuai dengan peribahasa '*Like Father Like Son*' atau '*Air Cucuran Atap Jatuhnya Ke Pelimpahan*'. Bahan induk yang subur akan menghasilkan tanah yang subur, sebaliknya bahan induk yang tidak bagus akan menghasilkan tanah yang tidak

Abdul Kadir Salam – 2020

subur. Misalnya, tanah yang berkembang dari bahan induk dengan kandungan mineral **Apatit** dalam jumlah tinggi maka akan menghasilkan tanah dengan kandungan Ca dan P relatif tinggi. Pemahaman terkait bahan induk tanah akan memberikan informasi tentang tingkat kesuburan tanah, khususnya berkaitan dengan kapasitas sangga tanah untuk unsur hara tertentu.

Faktor iklim, di antaranya curah hujan dan temperatur, dapat mengakibatkan batuan induk lebih 'lunak' sehingga lebih mudah mengalami proses pelapukan (Husnain dkk., 2003). Akibatnya setiap zone iklim memiliki jenis tanah yang berbeda walaupun berasal dari bahan induk yang sama. Organisme hidup seperti tanaman (tajuk maupun akar), bakteri, jamur, cacing tanah, semut, marmut, dan makhluk hidup lainnya membantu pembentukan setiap bagian dari tanah. Tanaman dan organisme menambah bahan organik dan humus di dalam tanah serta mempercepat pelapukan partikel tanah. Binatang tanah tertentu seperti cacing tanah juga berperan dalam mencampur bahan nir-organik berupa partikel tanah dengan berbagai bahan organik berupa humus yang berasal dari makhluk hidup. Posisi lahan, derajat kemiringan dan kedatarannya, disebut topografi, memengaruhi pelapukan bahan induk (Husnain dkk., 2003). Wilayah berbukit memiliki lebih banyak jenis tanah daripada wilayah yang datar, berkaitan dengan variasi kadar air tanah dan lebih intensifnya proses erosi di wilayah berbukit. Sama seperti halnya manusia, tanah juga akan semakin tua dengan berjalannya waktu karena semakin lamanya pengaruh berbagai proses yang memengaruhi pembentukan tanah.

Kualitas bahan Induk umumnya ditentukan oleh komposisi mineral yang terkandung di dalamnya. Bahan induk tanah mineral terdiri dari tiga kelompok, yaitu Batuan Kristalin, Batuan Sedimen, dan Batuan Deposit Baru (**Tabel 3.3**). Batuan Kristalin mencakup Batuan Granit, Batuan Gabro, dan Batuan Basaltik. Sebagian besar batuan ini tidak terlihat di permukaan bumi karena terletak pada kedalaman tertentu, sering di bawah lapisan Batuan Pasir (*Sandstone*) atau Batuan Lempeng (*Shale*). Batuan Kristalin umumnya berada di bawah **Regolith** (bagian batuan yang telah mengalami penghancuran). Batuan ini dinamakan kristalin karena di dalamnya mengandung berbagai mineral yang berbentuk kristal.

Seperti diungkapkan sebelumnya, Granit berwarna merah jambu atau kelabu muda dan mengandung butiran kuarsa dan kristal feldspars berwarna pucat. Tanah yang terbentuk dari batuan granit mengandung partikel dengan berbagai ukuran dari kerikil dan pasir sampai liat yang berukuran halus. Butiran kuarsa yang tampak seperti pecahan kaca dalam batuan granit sangat tahan terhadap pelapukan sehingga menjadi butiran pasir di dalam tanah. Mineral lain di dalam batuan ini yang kurang tahan terhadap proses pelapukan seperti feldspars (berwarna pucat)

dan mineral kalam yang kaya besi dan magnesium (mineral feromagnesia) berubah melalui pelapukan menjadi partikel liat halus.

Tabel 3.3. Pengelompokan batuan induk*.

Kelompok Batuan		Sifat dan Mineralogi	Sifat Tanah yang Terbentuk
Kristalin (di bawah permukaan, di bawah Regolith)	Granit	Merah jambu/kelabu muda: kuarsa, seperti pecahan kaca, tahan lapuk Feldspars/pucat, Ferromagnesia/kelam yang tidak tahan lapuk	Berpasir Berliat, merah, lengket, subur
	Gabro	Hitam/kelabu tua, butiran kasar; Feromagnesia dan Feldspars gelap, tanpa kuarsa	Berliat, merah, lengket, subur
	Basaltik	Hitam/kelabu tua, butiran kasar; Feromagnesia dan Feldspars gelap, tanpa kuarsa, butiran halus	Berliat, merah, lengket, subur
Sedimenter	Batuan Pasir (<i>Sandstone</i>)	Sedimen pasir dekat pantai; kuarsa direkat jadi satu	
	Batuan Lempeng (<i>Shale</i>)	Sedimen lumpur kelabu (agak jauh dari pantai): Kuarsa liat dan debu + feldspars	
	Batuan Gamping/ Batuan Kapur (<i>Limestone</i>)	Sedimen lumpur putih (sangat jauh dari pantai): butiran kapur	
Deposit Baru	Endapan Abu Vulkan		
	Endapan Aluvial		

*Diadaptasi dari Singer dan Munns (1987); Harpstead dkk. (1988)

Batuan kristalin berwarna hitam atau kelabu tua mencakup Gabro (berbutiran kasar) dan Batuan Basaltik (berbutiran halus). Batuan ini mengandung mineral feromagnesia dan feldspars berwarna gelap. Karena batuan ini tidak mengandung kuarsa, tanah yang berasal dari batuan gabro dan batuan basaltik tidak berpasir tetapi berliat dan lengket serta agak merah dan subur.

Batuan sedimenter di hampir 75% lahan di permukaan bumi berada di bawah Regolith. Batuan ini awalnya berasal dari endapan di bagian bawah dan pantai laut di jaman dulu. Pasir diendapkan dekat pantai, lumpur berwarna kelabu agak jauh dari pantai, dan lumpur putih berkapur sangat jauh dari pantai. Lapisan ini secara bertahap mengeras masing-masing membentuk batuan pasir (*sandstone*), batuan lempeng (*shale*), dan batuan gamping (*limestone*). Batuan pasir mengandung butiran kuarsa yang diikat menjadi satu; batuan lempeng terdiri dari kuarsa berukuran liat dan debu plus feldspars; sedangkan batuan gamping mengandung butiran kapur. Dasar laut kemudian secara perlahan terangkat menjadi daratan. Tanah kemudian terbentuk dan berkembang dari batuan ini melalui proses pembentukan dari batuan ini setelah melalui waktu yang sangat panjang. Tanah yang berkembang dari batuan pasir adalah tanah berpasir dan yang berkembang dari batuan lempeng dan batuan kapur berliat.

Seperti telah diungkapkan sebelumnya, di antara endapan baru yang terpenting untuk kondisi Indonesia adalah endapan abu vulkanik dan endapan aluvial. Abu vulkanik menyebar di berbagai wilayah di Indonesia. Di antaranya yang sangat terkenal adalah yang disebabkan oleh letusan Gunung Krakatau di Selat Sunda, G. Galunggung di Jawa Barat, dan G. Merapi di Jawa Tengah – Jogjakarta (Simkin dan Fiske, 1983; Katili dan Sudrajat, 1984; Salam, 1995c). Penyebaran abu vulkanik dapat mencapai jarak ratusan kilometer dari pusat letusan. Abu letusan G. Galunggung pada tahun 1982-1983 bahkan mencapai Jakarta, Bogor, Cirebon, dan Jogjakarta. Kandungan mineral abu vulkanik sangat bervariasi, namun secara umum tanah yang berkembang dari abu vulkanik berkualitas sangat baik untuk produksi pertanian. Abu G. Merapi, misalnya, selain mengandung berbagai unsur basa seperti Ca, Mg, K, dan Na, juga mengandung P dalam jumlah yang relatif tinggi (Salam, 1995c). Beberapa penelitian juga menunjukkan hal yang sama dengan abu vulkanik yang berasal dari letusan G. Galunggung dan G. Krakatau (Simkin dan Fiske, 1983; Katili dan Sudrajat, 1984; Salam, 1995c).

Tanah aluvial berkembang dari hasil erosi yang diendapkan oleh aliran sungai di berbagai lembah. Proses ini telah menciptakan berbagai wilayah yang sangat subur, misalnya Dataran Bangkok, Delta Mekong, Delta Mississippi, dan daratan yang sangat luas di Cina, Mesir, Irak, dan Pulau Jawa bagian Utara. Sekitar sepertiga kehidupan manusia bumi ditopang oleh lahan subur yang berkembang di

daerah aluvial, yang kaya bahan topsoil yang diangkut dari wilayah yang lebih tinggi. Dengan demikian, walaupun merupakan bencana bagi kehidupan manusia di satu sisi, di sisi lain banjir juga membentuk wilayah tertentu dengan tanah yang sangat subur.

Tanah aluvial umumnya berlapis sampai kedalaman tertentu. Menurut perkiraan, setiap lapisan diduga mewakili suatu kejadian banjir tertentu pada masa lalu. Tanah ini secara horizontal juga menunjukkan perbedaan, agak berpasir di dekat pinggiran sungai dan berliat di tempat yang jauh dari pinggiran sungai.

Tanah yang berkembang dari bahan induk dengan mineral yang miskin hara akan memiliki banyak permasalahan pada saat akan digunakan untuk pertanian intensif. Untuk memperbaikinya dapat dilakukan dengan penambahan pupuk dan memperbaiki beberapa sifat utama tanah seperti pH dan kandungan bahan organik tanah. PT Gunung Madu Plantations (perkebunan tebu) dan PT *Great Giant Pineapple* (perkebunan nenas) di Provinsi Lampung mengintroduksi 'bahan induk' dari luar dalam bentuk batuan fosfat dalam jumlah banyak pada awal pembukaannya. Analisis pada tahun 1999 menunjukkan bahwa tanah di perkebunan tersebut memiliki P-tersedia dalam jumlah tinggi padahal termasuk tanah Entisols (**Tabel 3.4**).

Iklim. Iklim memberi pengaruh yang sangat besar terhadap pembentukan tanah karena pengaruhnya sangat nyata terhadap pelapukan tanah. Pelapukan tanah akan berlangsung dahsyat di bawah pengaruh iklim yang ekstrim. Di antara faktor iklim terpenting yang sangat memengaruhi proses pelapukan tanah adalah: kadar air, curah hujan, intensitas cahaya matahari, dan temperatur tanah. Kadar air dan curah hujan sangat berkaitan erat, demikian juga antara intensitas cahaya matahari dan temperatur tanah.

Kadar air menunjukkan jumlah air yang ada di dalam tanah, yang mengisi pori-pori mikro dan meso tanah. Air merupakan media penting bagi reaksi kimia. Pelapukan kimia dapat berlangsung lebih cepat dalam keberadaan air di dalam tanah (lihat **Reaksi 1.1**, pelapukan Albit). Proses pelapukan kimia mineral tanah secara umum tidak akan berlangsung tanpa kehadiran air. Penambahan air ke dalam tanah akan meningkatkan kecepatan pelapukan kimia mineral tanah. Oleh karena itu, pelapukan tanah di wilayah tropika basah dengan curah hujan yang tinggi berlangsung relatif cepat.

Dekomposisi bahan organik juga sangat tergantung pada kadar air. Misalnya, aktivitas fosfatase, yang mempercepat proses dekomposisi P-organik menjadi P-nir-organik, lebih tinggi dengan semakin tingginya kadar air tanah sampai tingkat

tertentu (**Gambar 1.3**). Hal ini dikarenakan senyawa-senyawa fosfatase yang terikat pada kompleks jerapan dapat dibebaskan bila air tanah hadir dalam jumlah cukup. Selain itu, kadar air yang lebih tinggi juga merangsang meningkatnya populasi dan aktivitas mikroorganisme, makroorganisme, dan akar tanaman, yang merupakan penghasil enzim fosfatase.

Tabel 3.4. Analisis P-tersedia tanah perkebunan tebu PT Gunung Madu Plantations dan perkebunan nenas PT Great Giant Pineapple di Lampung Tengah*.

No	Lama Penggunaan (tahun)	P-Tersedia (mg kg ⁻¹)
A. Perkebunan Tebu:		
1	0**	8.44
2	3	7.19
3	9	8.16
4	13	23.1
5	20	63.6
B. Perkebunan Nenas:		
1	0***	199.0
2	5	3.17
3	10	3.17
4	15	11.0
5	20	21.5

*Diadaptasi dari Salam dkk. (1999e); **Belukar dekat perkebunan; *** baru dibuka

Keberadaan air tanah juga memudahkan pergerakan dan penyerapan unsur hara oleh akar tanaman. Unsur hara yang dibebaskan oleh mineral tanah dalam bahan induk masuk ke dalam air tanah. Unsur hara kemudian bergerak dengan aliran massa atau difusi menuju permukaan akar tanaman dengan air sebagai media gerak. Unsur hara akhirnya diserap oleh akar tanaman ketika berada dekat dengan permukaan akar tanaman. Akar tanaman hanya menyerap unsur hara dari dalam air tanah yang berdekatan dengan permukaan serap akar tanaman.

Abdul Kadir Salam – 2020

Fenomena ini juga menunjukkan bahwa proses pembentukan tanah sangat dipengaruhi oleh air tanah.

Penyerapan unsur hara secara masif oleh akar tanaman akan menurunkan konsentrasi ion unsur hara di dalam air tanah. Menurunnya konsentrasi unsur hara di dalam air tanah akan memicu berlakunya Hukum Aksi Massa yang mengakibatkan semakin cepatnya proses pelapukan mineral tanah. Proses ini akan berlangsung lebih dahsyat bila juga terjadi pencucian hasil pelapukan mineral tanah oleh pergerakan air gravitasi (perkolasi) akibat tingginya curah hujan.

Curah hujan juga memengaruhi perubahan bahan induk dengan berbagai cara. Ukuran kerikil di dalam aliran sungai berkurang karena bertabrakan satu sama lain secara temerus di dalam aliran sungai. Air hujan yang jatuh dari langit karena gravitasi dapat secara perlahan menghancurkan batuan di permukaan bumi. Penghancuran secara mekanik seperti ini dinamakan pelapukan fisika. Setelah pelapukan fisika terjadi, pelapukan kimia dengan melibatkan berbagai reaksi kimia yang dapat memperkecil ukuran partikel batuan selalu mengikuti. Reaksi kimia yang melibatkan mineral penyusun batuan dan air bahkan lebih dahsyat daripada pelapukan secara mekanik.

Seperti telah diungkapkan sebelumnya, air merupakan medium yang di dalamnya terdapat ion H^+ dan berbagai jenis asam organik yang diekskresikan oleh akar tanaman dan mikroorganisme tanah. **Ion H^+ dan asam organik** adalah agen kimiawi yang dapat menghancurkan mineral penyusun batuan induk. Dalam proses hidrolisis, misalnya, ion H^+ dapat menggantikan ion logam yang menyusun mineral, yang menyebabkan ion logam lepas dari mineral dan batuan hancur. Oleh karena itu, proses pelapukan akan berjalan lebih cepat bila pH tanah relatif rendah (**Gambar 3.4**). Air juga berfungsi membawa hasil pelapukan sehingga menyebabkan proses pelapukan berjalan secara temerus. Semakin deras pergerakan air membawa hasil pelapukan mineral, semakin cepat pula proses pelapukan mineral di dalam batuan induk. Kecepatan pergerakan air di dalam tanah sangat ditentukan oleh curah hujan di wilayah tempat tanah tersebut berada.

Air juga menyebabkan terjadinya reaksi hidrasi. Ketika ion logam dibebaskan dari mineral tanah, beberapa di antaranya cenderung untuk bersenyawa membentuk garam di dalam air tanah. Bila oksigen dalam keadaan cukup, beberapa ion seperti besi (Fe) dan mangan (Mn) teroksidasi menjadi oksida melalui proses oksidasi. Beberapa di antara oksida mempunyai kecenderungan untuk bergabung dengan air sehingga mengembang. Proses ini disebut **Hidrasi**. Salah

satu contoh klasik terkait dengan oksidasi dan hidrasi adalah terjadinya **pengaratan besi**.

Intensitas sinar matahari memengaruhi **temperatur tanah**; semakin tinggi intensitas sinar matahari akan mengakibatkan semakin tingginya temperatur tanah. Kedua faktor ini secara langsung atau tidak langsung berpengaruh terhadap proses pelapukan mineral tanah. Umumnya, pada temperatur 0 °C tidak akan terjadi proses pelapukan. Pelapukan mineral tanah akan berlangsung semakin cepat dengan semakin tingginya temperatur tanah. Telah diketahui bahwa secara umum kecepatan reaksi kimia berjalan dua sampai tiga kali lebih cepat dengan meningkatnya temperatur 10 °C (Sparks, 1989). Peningkatan kecepatan reaksi dengan meningkatnya temperatur telah digambarkan dalam persamaan Arrhenius sebagai berikut (Sparks, 1989):

$$k = Ae^{-E/RT} \dots\dots \text{Pers. 3.6}$$

dengan k adalah konstanta kecepatan reaksi, A faktor frekuensi, E energi aktivasi, R konstanta gas umum, dan T temperatur dalam °K.

Dengan alasan di atas, tanah di Indonesia, yang memiliki temperatur rata-rata relatif tinggi, lebih cepat lapuk dan lebih cepat menjadi tua dibandingkan dengan tanah di Amerika Utara yang secara teratur mengalami temperatur relatif rendah setiap tahunnya. Tingginya temperatur tanah ditambah dengan curah hujan yang relatif tinggi sepanjang tahun membuat sebagian tanah di Indonesia secara umum lebih cepat mengalami pelapukan dan pemiskinan sebagai akibat dari derasnya pencucian hasil pelapukan mineral oleh air perkolasi.

Relief. Relief menunjukkan tinggi rendahnya permukaan lahan. Faktor ini juga sangat menentukan kecepatan pelapukan mineral tanah. Air pada tanah di lahan yang relatif datar secara umum akan terinfiltrasi ke dalam tanah dan mengalami perkolasi, yang menyebabkan terjadinya proses pencucian. Tanah di lahan datar akan mengalami pelapukan kimia relatif cepat, khususnya bila temperatur tanah dan curah hujan relatif tinggi. Proses pencucian yang lebih intensif akan menurunkan konsentrasi produk pelapukan mineral tanah sehingga dapat memicu keberlangsungan proses pelapukan.

Sebaliknya tanah di lahan yang miring akan mengalami proses yang jauh berbeda dengan tanah di lahan datar. Proses infiltrasi dan perkolasi serta pencucian berlangsung tidak signifikan dibandingkan dengan proses erosi, khususnya bila curah hujan dan kemiringan lahan relatif tinggi. Proses ini akan

menyisakan subsoil dan mengirimkan hasil erosi ke tanah di lahan datar yang lebih rendah. Hasil erosi akan diakumulasikan di lahan datar yang terletak di bagian lebih bawah dan mengakibatkan tanah ini lebih subur. Sebaliknya, tersingkapnya subsoil karena terkikisnya topsoil oleh erosi di lahan berlereng mengakibatkan subsoil menjadi topsoil baru. Fenomena ini mengakibatkan tanah di lereng selalu muda dan termasuk tanah Entisols.

Organisme. Organisme memberikan pengaruh yang sangat besar dan dinamis terhadap proses pembentukan tanah. Secara umum, sifat-sifat tanah akan berbeda satu dengan yang lainnya berkaitan dengan perbedaan organisme dominan yang memengaruhi pembentukannya. Pengaruh ini dapat bersifat fisika, kimia, atau pun biologis.

Introduksi bahan organik yang berasal dari organisme tanah, termasuk akar tanaman, meningkatkan kandungan bahan organik tanah. Karena secara fisika bahan organik berperan sebagai perekat, maka kehadiran bahan organik akan memperbaiki agregasi dan struktur tanah. Perubahan fisika seperti ini juga akan memengaruhi kemantapan agregat tanah yang berperan dalam menahan daya rusak percikan air hujan dan memperlancar proses infiltrasi dan perkolasi air di dalam tubuh tanah sehingga drainase akan berjalan lancar.

Meningkatnya kandungan bahan organik tanah juga mempengaruhi kimia tanah karena selain merupakan sumber unsur hara, bahan organik tanah juga meningkatkan kandungan humus tanah, yang merupakan koloid tanah. Akibatnya, secara tidak langsung organisme tanah meningkatkan kandungan N-total, C-Organik, dan basa-basa. Organisme tanah juga meningkatkan KTK dan KB tanah serta menurunkan kelarutan unsur hara mikro dan logam berat. Derajat pengaruh bahan organik sangat tergantung pada jenis dan sifat organisme yang menjadi pemasoknya (**Tabel 3.5**).

Telah diketahui bahwa humus merupakan salah satu komponen tanah yang sangat penting dan jumlahnya di dalam tanah sangat dipengaruhi oleh jenis tanaman yang tumbuh di atasnya (Handayani dan Prawito, 1998; Handayani, 2001). Alih fungsi lahan belukar untuk pertanaman singkong secara temerus di Gunung Batin Lampung Utara mengakibatkan menurunnya P-Tersedia dan K-dd secara tajam; juga menurunkan ketersediaan unsur mikro kelompok logam berat (Salam dkk., 1997b). Penelitian di Lampung Barat (**Tabel 3.5**) menunjukkan bahwa setelah diterapkan selama > 2 tahun, perlakuan **vegetasi penutup** secara signifikan memengaruhi beberapa sifat kimia tanah. Perlakuan dengan rumput *Paspalum conjugatum* atau vegetasi alami menghasilkan kandungan C-Organik, N-Total, P-Tersedia, dan aktivitas enzim (Fosfatase, Urease, Arilsulfatase, dan β -Glucosidase)

Abdul Kadir Salam – 2020

lebih tinggi daripada perlakuan Kontrol. Amatan menunjukkan bahwa pengaruh kedua jenis vegetasi ini tidak hanya pada topsoil tetapi juga pada subsoil, walaupun kadarnya di subsoil lebih rendah. Rumput *P. conjugatum* memengaruhi kandungan C-Organik dan N-Total lebih tinggi dibandingkan vegetasi alami (Salam, 1996; Salam dkk., 2001).

Amatan lain juga menunjukkan bahwa pH tanah di daerah perakaran alang-alang lebih tinggi daripada di daerah perakaran bayam cabut, bayam duri, dan teki wudelan. Kelarutan Fe, Cu, dan Pb secara umum lebih rendah di daerah perakaran alang-alang daripada di daerah perakaran bayam cabut, bayam duri, dan teki wudelan. Aktivitas fosfatase asam dan fosfatase alkalin juga lebih tinggi di daerah perakaran alang-alang dibandingkan dengan di daerah perakaran bayam cabut, bayam duri, dan teki wudelan (Salam dkk., 1997a). Aktivitas fosfatase asam juga dilaporkan menurun dengan meningkatnya umur tanaman singkong sampai 4.5 bulan (Salam dkk., 1999a). Fenomena ini menunjukkan bahwa perbedaan jenis tanaman mengakibatkan perubahan-perubahan penting pada sifat kimia tanah.

Tabel 3.5. Pengaruh Jenis vegetasi terhadap beberapa sifat kimia tanah di perkebunan kopi di wilayah berlereng Lampung Barat*.

	pH		C-Organik (g kg ⁻¹)		Total N (g kg ⁻¹)		P-Tersedia (mg kg ⁻¹)	
	1997	1999	1997	1999	1997	1999	1997	1999
A. Tanpa Vegetasi (Kontrol)								
Topsoil	4.00	3.49	23.1	21.1	1.80	1.50	6.05	2.78
Subsoil	3.87	4.27	11.7	7,8	0.90	1.10	4.67	3.48
B. Rumput (<i>Paspalum conjugatum</i>)								
Topsoil	4.94	3.87	30.5	29.2	1.30	2.70	4.67	3.52
Subsoil	4.66	4.89	26.1	26.9	2.00	1.90	4.67	3.11
C. Vegetasi Alami								
Topsoil	4.58	3.97	12.4	26.7	1.30	2.40	5.36	3.52
Subsoil	4.47	4.56	11.4	20.6	1.10	1,40	4.67	2.81

*Diadaptasi dari Salam dkk. (2001)

Contoh lain, rerumputan memiliki perakaran yang sangat halus dan berkembang sangat ekstensif dan dapat memasuki bahkan pori mikro di dalam tanah, sehingga bila akar tanaman ini mati dan terdekomposisi selama ribuan tahun, tanah tersebut akan mendapat pasokan humus dalam jumlah besar. Sebaliknya, akar pohon jauh lebih besar, sehingga tidak memasuki pori tanah seekstensif perakaran rerumputan. Akibatnya, tanah hutan mengandung humus dalam jumlah yang lebih rendah. Oleh karena itu, tanah padang rumput cenderung memiliki KTK dan KB lebih tinggi dan secara umum lebih subur (Harpstead dkk., 1988; Rumpel dkk., 2015).

Tanaman berpengaruh tidak hanya terhadap kandungan humus tanah, tetapi juga terhadap pH tanah. Tanah yang ditumbuhi oleh rerumputan memiliki pH yang relatif lebih tinggi dibandingkan dengan tanah yang ditanami tanaman berdaun jarum. Analisis menunjukkan bahwa daun rerumputan ternyata lebih alkalin karena mengandung unsur basa seperti Ca dan Mg dalam jumlah yang lebih tinggi dibandingkan daun tanaman berdaun jarum seperti cemara dan pinus. Daun tanaman berdaun lebar memiliki pH lebih tinggi daripada tanaman berdaun jarum, namun lebih rendah daripada daun rerumputan (Harpstead dkk., 1988).

Aktivitas manusia (antropogenik) juga sangat memengaruhi proses pembentukan tanah. Manusia mengintroduksi berbagai bahan kimia organik dan nir-organik ke dalam lahan pertanian. Bahan-bahan ini akan mengalami berbagai reaksi kimia dan memberikan pengaruh yang sangat signifikan terhadap tanah. Misalnya, pengelolaan tanah di lahan perkebunan nenas milik PT *Great Giant Pineapple* dan perkebunan tebu di PT *Gunung Madu Plantations* Lampung Tengah sangat memengaruhi sifat-sifat kimia tanah. Lamanya penggunaan tanah untuk budidaya tanaman nenas dan tebu mengakibatkan perubahan yang sangat signifikan, misalnya terhadap P-tersedia. Fenomena ini diperlihatkan dalam contoh pada **Tabel 3.4** (Salam dkk., 1999e).

Alih fungsi lahan juga berpengaruh terhadap berbagai sifat kimia, biologi, dan fisika tanah. Aktivitas antropogenik telah beberapa dekade terakhir ini mengubah wajah Lampung Barat yang sebelumnya sebagian besar berupa hutan primer, sebagian berubah menjadi hutan sekunder. Sebagian besar dari hutan primer dan hutan sekunder bahkan berubah menjadi lahan perkebunan kopi dan perladangan intensif (**Tabel 3.6**). Misalnya, pada tahun 1978 hutan primer mencakup 32.60%, dalam enam tahun menurun drastis menjadi 21.39% pada tahun 1984, dan menjadi 12.72% dalam 12 tahun pada tahun 1990. Sebaliknya, perkebunan monokultur yang pada tahun 1978 mencakup 20.83% meningkat drastis menjadi 41.77% dalam waktu 6 tahun pada tahun 1984. Padang rumput yang pada tahun 1978 mencakup

10.44% menurun drastis dalam 12 tahun menjadi 1.12 % pada tahun 1990 (Salam dkk., 1998d).

Tabel 3.6. Perubahan persentase sistem penggunaan lahan di Lampung Barat dari 1978–1990.

No.	Jenis Penggunaan Lahan	1978	1984	1990
1	Wilayah Permukiman	1.03	1.70	2.20
2	Sawah	2.92	5.02	5.35
3	Lahan Kering (Tanaman Pangan dan Sayuran)	2.20	1.07	0.12
4	Lahan Kering (Pertanian Bepindah)	4.81	0.33	0.00
5	Lahan Perkebunan (Monokultur)	20.83	41.77	41.11
6	Lahan Perkebunan (Campuran)	0.93	0.95	19.26
7	Hutan Primer	32.60	21.39	12.72
8	Hutan Sekunder	16.20	10.79	18.05
9	Kolam	0.03	0.01	0.07
10	Padang Rumput	18.44	16.98	1.12

Diadaptasi dari Salam dkk. (1998d)

Perubahan di atas mengubah sifat-sifat kimia tanah, seperti diperlihatkan pada **Tabel 3.7** (Salam dkk., 1998d). Kandungan bahan organik, N-Total, P-Tersedia, dan KTK tanah adalah empat buah sifat kimia yang berubah sangat drastis dengan berubahnya fungsi lahan dari hutan primer, ke hutan sekunder, perkebunan kopi, dan perladangan intensif. Alih fungsi lahan secara umum mengakibatkan degradasi sifat kimia tanah. Misalnya, KTK tanah di Hutan Primer pada tahun 1998 adalah $43.2 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$. KTK Hutan Sekunder pada saat itu lebih rendah, yaitu $18.5 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, sekitar sama dengan KTK Subsoil Hutan Primer. KTK di Lahan Kopi dan Ladang sekitar sama, masing-masing 11.4 dan $14.4 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$. Kedua angka ini jauh di bawah KTK Hutan Sekunder dan Hutan Primer. Ketersediaan unsur mikro (Cu, Fe, dan Zn) di lokasi yang sama juga menurun dengan alih fungsi lahan, berkorelasi

Abdul Kadir Salam – 2020

dengan menurunnya C-organik, N-total, dan KTK tanah (Salam, 1999). Fenomena ini memperlihatkan dengan gamblang bahwa perbedaan tanaman mengakibatkan arah perkembangan tanah yang berbeda.

Tabel 3.7. Pengaruh alih fungsi lahan terhadap beberapa sifat kimia tanah di Bukit Ringgis Lampung Barat*.

	Kedalaman (cm)	Elevasi (m)	pH (H ₂ O 1:1)	C-Organik (g kg ⁻¹)	N-Total (g kg ⁻¹)	P-Tersedia (mg kg ⁻¹)	KTK (cmol _c kg ⁻¹)
Hutan Primer	0 – 20	1,550	4.4	60.4	5.5	4.0	43.2
	20 – 40		4.8	25.0	2.3	1.5	18.2
Hutan Sekunder	0 – 20	1,400	5.4	41.4	3.4	2.1	18.5
	20 – 40		4.9	21.7	2.0	1.5	13.7
Lahan Kopi	0 – 20	1,120	4.9	28.5	2.3	1.5	11.4
	20 – 40		4.9	10.1	1.2	1.0	12.5
Ladang	0 – 20	1,100	4.4	15.8	1.7	1.5	12.4
	20 – 40		4.3	7.5	0.8	0.7	1.2

*Diadaptasi dari Salam dkk. (1998d)

Di antara sifat fisika tanah yang terpengaruh oleh alih fungsi lahan adalah pergeseran temperatur udara dan temperatur tanah. Perubahan ekosistem alami menjadi ekosistem pertanian modern dan/atau ekosistem perkampungan atau perkotaan mengakibatkan peningkatan temperatur udara dan temperatur tanah (Savva dkk., 2010). Perubahan ini menimbulkan pengaruh berantai, misalnya perubahan populasi dan aktivitas mikroorganisme tanah, produksi enzim, kandungan bahan organik, dan akhirnya siklus C, N, dan S. Karena kadar air tanah tergantung pada kandungan bahan organik tanah, sifat-sifat fisika tanah ini dan faktor-faktor lain yang terkait dengan kadar air tanah juga akan terpengaruh.

Selain memengaruhi sifat-sifat fisika dan kimia tanah, organisme juga memengaruhi sifat biologi tanah. Secara umum, meningkatnya kandungan bahan organik tanah meningkatkan pula kandungan C-organik dan N-total tanah. Kedua

Abdul Kadir Salam – 2020

unsur ini sangat diperlukan oleh mikroorganisme tanah untuk dapat bertumbuh dan berkembang; C-organik sebagai sumber energi dan N sebagai pembentuk protein penyusun tubuh. Oleh karena itu, aktivitas enzim fosfatase di dalam tanah meningkat sebanding dengan meningkatnya kandungan C-Organik atau N-Total tanah (Salam dkk., 1999d; 1999e). Fosfatase adalah enzim yang berperan mempercepat perombakan P-organik menjadi P-nir-organik di dalam tanah. Enzim ini diproduksi oleh mikroorganisme tanah, makroorganisme tanah (misal cacing tanah), dan akar tanaman. Meningkatnya produksi fosfatase dilaporkan sebanding dengan meningkatnya populasi dan aktivitas mikroorganisme tanah.

Selain pengaruh di atas, perubahan sifat-sifat tanah yang diakibatkan oleh kehadiran organisme juga akan berpengaruh terhadap kecepatan dekomposisi bahan organik dan pelapukan mineral tanah. Dengan kehadiran berbagai enzim di dalam tanah, dekomposisi bahan organik akan berjalan lebih cepat. Kehadiran asam-asam organik dan penurunan pH akibat proses pencucian yang berlangsung sangat hebat juga akan dengan cepat pula melapuk berbagai mineral di dalam tanah. Dengan berbagai kombinasi penyebab perubahan tersebut, dapat difahami bahwa kehadiran organisme tanah akan sangat berpengaruh terhadap proses pembentukan tanah.

Penghilangan vegetasi dari permukaan tanah juga mengubah sifat fisika tanah. Karena persentase penutupan tanah berkurang, proses limpasan permukaan dan erosi akan lebih intensif. Castillo dkk. (1997) menunjukkan bahwa terjadinya limpasan permukaan dan erosi meningkatkan kerapatan isi tanah sebesar 8.4% serta menurunkan total C organik 4 – 28% dan stabilitas agregat dari sebuah tanah di Spanyol.

Waktu. Pembentukan tanah adalah sebuah proses, sehingga memerlukan waktu. Semakin lama waktu yang telah terlampaui, akan semakin lanjut proses pembentukan tanah. Bahan induk pembentuk tanah akan bermula dari bahan induk muda, yang akan mengalami pelapukan. Dengan berjalannya waktu di bawah pengaruh relief, iklim, dan organisme tertentu, bahan induk akan berubah menjadi bentuknya yang lebih stabil. Sebagian dari proses ini akan berlangsung cepat, sebagiannya lagi akan berlangsung lambat, tergantung pada kelima faktor pembentukan tanah yang terlibat. Tanah yang telah berkembang (misalnya Ultisols) memiliki horizonisasi lengkap sedangkan tanah muda (seperti Entisols) hanya memiliki Horizon A yang langsung duduk di atas Horizon C atau bahkan di atas Horizon R.

Para ahli tanah secara matematika menggambarkan hubungan di atas dengan **Persamaan 2.1**, yang menunjukkan bahwa jenis tanah yang terbentuk sangat dipengaruhi oleh: (1) jenis bahan induk pembentuk tanah, (2) relief, (3) iklim, (4) organisme, dan (5) waktu. Dengan memperhatikan perumusan ini, dapat kita bayangkan akan banyak sekali jenis tanah yang terbentuk dengan sifat-sifat yang berbeda. Misalnya, simulasi dengan 10 sub-faktor untuk masing-masing faktor pembentuk tanah akan menghasilkan sekitar 10^5 atau 100.000 jenis tanah. Oleh karena itu, sampai dengan tahun 1988 di Amerika Serikat saja telah dideskripsikan sekitar 12.000 – 14.000 jenis tanah (Harpstead dkk., 1988; Buol dkk., 1989).

b. Pengaruh Perubahan pH

Reaksi tanah (pH) adalah salah satu parameter utama tanah yang sangat penting dalam lingkungan. Reaksi tanah sangat berpengaruh terhadap perkembangan tanah. Seperti telah diungkapkan sebelumnya bahwa proses penghancuran tanah berbanding terbalik dengan pH tanah (**Gambar 3.4**). Artinya, penghancuran mineral-mineral tanah akan berlangsung lebih intensif dan masif dengan meningkatnya konsentrasi ion H^+ di dalam tanah (Salam, 1989).

Seperti telah diungkap sebelumnya, ion H^+ berperan sebagai sebuah *Attacking Agent* yang bekerja mendekomposisi struktur mineral tanah sehingga membebaskan unsur-unsur penyusunnya. **Tabel 1.1** dan **Tabel 3.8** menunjukkan dekomposisi sebuah tanah Ultisols (dari Jawa Barat) dan sebuah tanah Mollisols (dari Wisconsin, Amerika Serikat) yang menghasilkan berbagai unsur penyusun mineral di dalam kedua jenis tanah tersebut. Sebagian unsur ini akan tetap berada di dalam air tanah, sebagian lagi diserap oleh akar tanaman, dan sebagian lagi terikat oleh koloid tanah. Sisanya dapat berkombinasi satu dengan lainnya untuk membentuk mineral sekunder, misalnya Kaolinit.

Ion H^+ di dalam sistem tanah berasal dari berbagai sumber. Sumber pertama adalah eksudat akar tanaman. Pada saat tanaman menyerap kation, maka tanaman akan menjaga kesetimbangan massa dan muatan di sekitar akar tanaman. Oleh karena itu, ketika akar tanaman menyerap sebuah kation dengan dua muatan positif, akar tanaman akan mengeluarkan dua buah ion H^+ untuk mengimbangi massa dan muatan yang diserap. Proses ini mengakibatkan konsentrasi ion H^+ di sekitar perakaran tanaman meningkat (Walker dkk., 2013; Huang dkk., 2014). Fenomena ini dapat memberikan dampak kimia tanah yang luar biasa. Misalnya, Yang dkk. (1996) melaporkan bahwa pH tanah di Rizosfir tanah Alfisol yang ditanami kedelai lebih rendah daripada tanah non-rizosfir di sekitarnya dengan perbedaan antara 0.07 sampai 0.65 satuan pH.

Abdul Kadir Salam – 2020

Tabel 3.8. Pengaruh pH terhadap pelapukan mineral tanah Mollisols dan Ultisols.

pH	Mollisols*		Ultisols**	
	Si	Al	Si	Al
 mg kg ⁻¹			
4	230	1,090	190	2,750
5	190	840	110	1,650
6	60	170	20	550
7	35	83	10	330

Catatan: Diadaptasi dari Salam (1989); *dari Wisconsin Amerika Serikat, ** dari Jawa Barat Indonesia

Evolusi CO₂ oleh akar tanaman yang melakukan respirasi senyawa hidrokarbon di dalam akar tanaman dapat secara tidak langsung juga mengasamkan tanah. Demikian juga CO₂ yang dihasilkan oleh aktivitas mikroorganisme tanah. Senyawa CO₂ bereaksi dengan air membentuk H₂CO₃ yang kemudian terurai menghasilkan ion H⁺ (**Reaksi 2.1**). Ion H⁺ yang dihasilkan dari reaksi ini akan mengasamkan tanah atau menurunkan pH tanah dan dengan sendirinya dapat meningkatkan kecepatan pelapukan mineral tanah.

Selain kedua sumber di atas, ada beberapa sumber lain yang menyebabkan meningkatnya konsentrasi ion H⁺ di dalam air tanah. Di antaranya adalah: (1) liat asam ber-H⁺, (2) ekskresi asam oleh akar tanaman, (3) aktivitas mikroorganisme, (4) hidrolisis kation, (5) hujan asam atau penggunaan pupuk tertentu seperti Urea, (6) kehadiran hidroksida dan oksida Fe dan Al, dan (7) pengangkutan kation basa dari sistem tanah.

c. Perkembangan Muatan Tanah

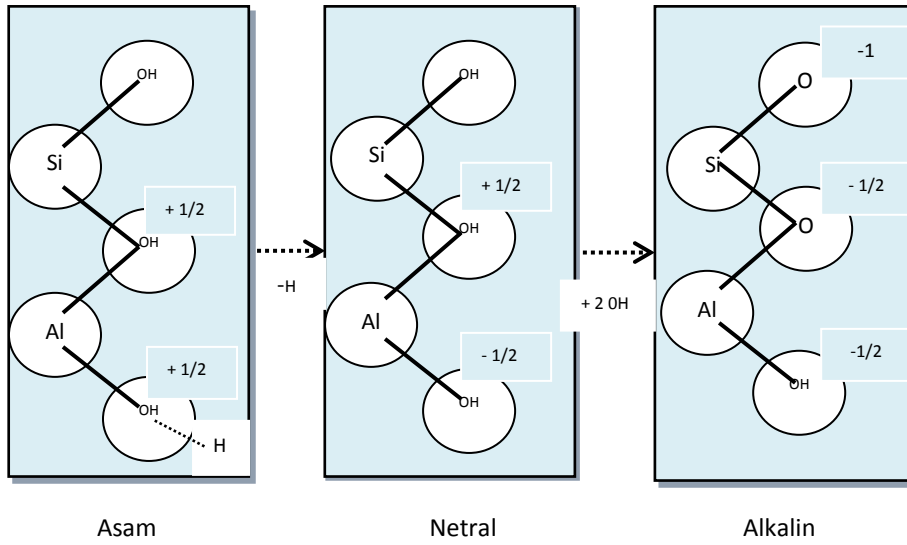
Salah satu sifat tanah yang juga sangat penting adalah reaktivitasnya, yang di antaranya ditunjukkan oleh muatannya. Secara umum tanah bermuatan negatif. Jumlah muatan negatif pada koloid tanah dikenal dengan nama Kapasitas Tukar Kation (KTK). Sebagian tanah ber-KTK tinggi, sebagian lagi ber-KTK rendah. Berkaitan dengan pengelolaan lahan pertanian dan lingkungan, kita memilih tanah dengan KTK tinggi. Tanah ber-KTK tinggi dianggap sangat bermanfaat untuk mengelola ketersediaan kation dan penjerapan kation logam toksik. Oleh karena itu berbagai usaha telah dilakukan untuk meningkatkan KTK tanah.

Muatan negatif di dalam tanah berasal dari tiga sumber, yaitu: (a). Muatan negatif patahan mineral liat, (b). Muatan negatif hasil substitusi isomorfik, dan c. Muatan negatif asal bahan organik. **Muatan negatif asal patahan mineral liat** dapat diperlihatkan pada **Gambar 3.7**. Muatan negatif ini sangat tergantung pada pH tanah. Pada pH rendah, saat konsentrasi ion H^+ tinggi, sebagian lokasi muatan diisi oleh ion H^+ . Akibatnya, sebagian muatan (-) berubah menjadi muatan (+), sehingga kemampuan tanah untuk menjerap kation menurun (KTK turun), sedangkan kemampuan untuk menjerap anion meningkat (KTA naik). Sebaliknya, pada pH tinggi, saat konsentrasi ion H^+ rendah atau konsentrasi ion OH^- tinggi, sebagian ion H^+ dibebaskan dan bereaksi dengan ion OH^- membentuk molekul H_2O . Akibatnya, kemampuan tanah untuk menjerap kation meningkat (KTK naik) sedangkan kemampuan untuk menjerap anion menurun (KTA turun).

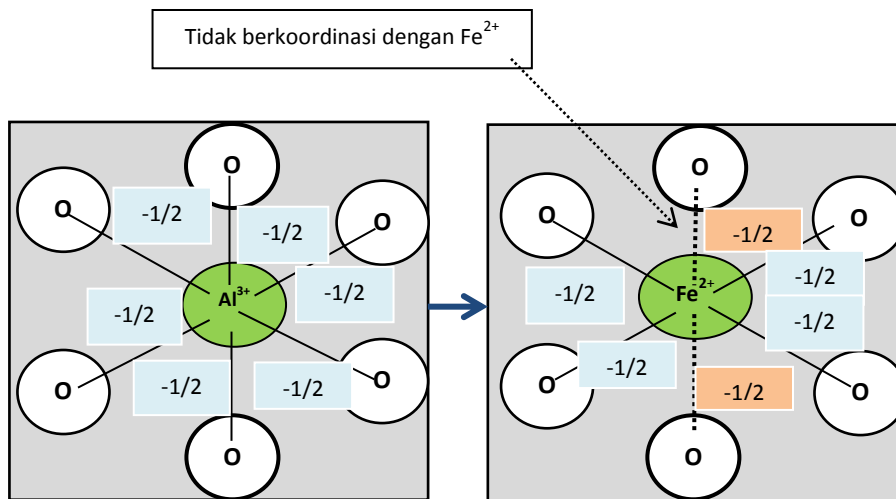
Substitusi isomorfik memunculkan muatan negatif secara unik dan tidak tergantung pada pH tanah. Proses ini umumnya terjadi pada tanah dengan kandungan mineral liat tipe 2:1 cukup signifikan. Kemunculan muatan negatif akibat substitusi isomorfik diperlihatkan pada **Gambar 3.8**. Muatan negatif yang dihasilkan melalui proses ini lebih tinggi daripada yang dihasilkan pada patahan mineral liat (**Tabel 3.9**). Akibatnya, tanah dengan kandungan mineral liat tipe 2:1 memiliki KTK yang tinggi.

Muatan negatif tanah juga muncul dari gugus fungsional bahan organik (**Gambar 3.9**) (Hart, 1987). Walaupun komposisi bahan organik di dalam tanah relatif rendah, tetapi pengaruhnya terhadap sifat dan lingkungan tanah sangat besar. Bahan organik secara umum memiliki KTK relatif tinggi, sehingga penambahan bahan organik dalam jumlah banyak akan mengakibatkan peningkatan KTK tanah secara signifikan. KTK beberapa jenis mineral tanah dan bahan organik disajikan pada **Tabel 3.9**. Terlihat bahwa Smektit dan Vermikulit, yang merupakan mineral liat Tipe 2:1, memiliki nilai KTK yang lebih tinggi daripada Kaolinit, yang merupakan mineral liat Tipe 1:1. Bahan organik juga terlihat memiliki KTK tinggi.

Bahan organik memiliki banyak gugus fungsional yang dapat menjadi sumber muatan negatif di dalam sistem tanah, di antaranya adalah gugus karboksilat ($R-COOH$) dan gugus fenolat (C_6H_5-OH). Kedua gugus fungsional ini dapat bermuatan positif pada pH rendah. Kehadiran ion H^+ dalam jumlah tinggi pada pH rendah mengakibatkan sebagian gugus fungsional ini diisi oleh ion H^+ , sehingga bermuatan netral atau bermuatan positif (**Gambar 3.9**). Sebaliknya, peningkatan pH akan menurunkan konsentrasi ion H^+ atau meningkatkan konsentrasi ion OH^- .



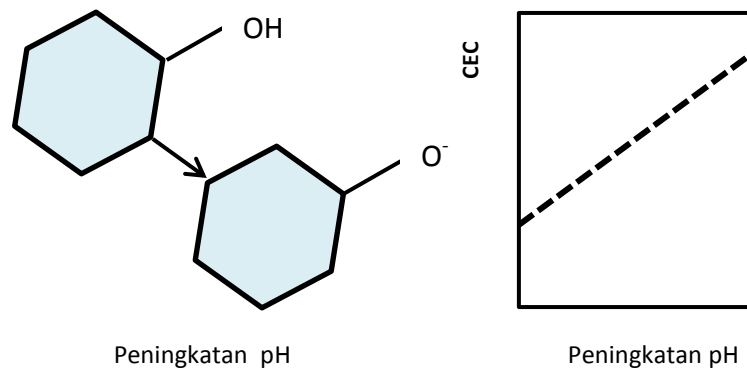
Gambar 3.7. Perkembangan muatan negatif tanah asal patahan mineral liat silikat (Bohn dkk.,1985).



Fe^{2+} (Bil Koordinasi = 4) menggantikan Al^{3+} (Bil Koordinasi = 6) menghasilkan muatan negatif = $2 \times (0.5) = -1$

Gambar 3.8. Perkembangan muatan negatif tanah akibat substitusi isomorfik (Bohn dkk., 1985).

Akibatnya, sebagian H^+ pada gugus fungsional dibebaskan dan meninggalkan lokasi-lokasi bermuatan negatif. Alhasil, tanah dengan bahan organik tinggi akan memiliki daya jerap tanah terhadap kation yang lebih tinggi dan daya jerapnya terhadap anion lebih rendah.



Gambar 3.9. Perkembangan muatan negatif tanah pada gugus fungsional bahan organik (Bohn dkk., 1985).

Dengan demikian, tanah memiliki muatan negatif dari tiga sumber, dua di antara sumber tersebut yaitu patahan mineral dan bahan organik sangat tergantung pada pH dan satu sumber yaitu substitusi isomorfik tidak tergantung pada pH tanah. Ketiga sumber ini akan selalu berkembang tergantung pada faktor pembentukan tanah (**Pers. 2.1**). Sebagian tanah akan berkembang lambat, sebagian lagi akan berkembang cepat. Secara umum, tanah yang sangat muda akan memiliki KTK relatif rendah. Tanah yang telah matang akan memiliki KTK yang tinggi. KTK akan menurun dengan menuanya mineral-mineral penyusun tanah (**Tabel 3.10**). Misalnya, tanah dengan kandungan montmorilonit dengan KTK tinggi lebih muda dibandingkan dengan tanah dengan kandungan kaolinit tinggi. Namun demikian, nilai KTK tanah secara langsung atau tidak langsung dapat dipugar dengan berbagai bahan, misalnya dengan penambahan bahan organik, penambahan amelioran seperti kapur, dan seterusnya.

Tabel 3.9. KTK beberapa jenis mineral tanah dan bahan organik*.

No.	Mineral	KTK ($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$)
1	Alofan	50 – 100
2	Oksida Fe dan Al (pH 8)	0.5 – 1.0
3	Kaolinit	3 – 20
4	Illit	10 – 40
5	Smektit	60 – 100
6	Vermikulit	100 – 200
7	Bahan Organik/Humus	150 – 200
8	Humat	200 – 750
	- Asam Fulfik	500 – 750
	- Asam Humik	300 – 500
	- Humin	300

*Diadaptasi dari Thomas dan Hargrove (1984), Burns (1986)

Tabel 3.10. Jenis mineral sesuai dengan perkembangan atau pelapukan tanah*.

Tingkat Pelapukan	Mineral Dominan dalam Fraksi Liat
Rendah	Gypsum, Sulfida, Garam Laut
	Kalsit, Dolomit, Apatit
	Olivin, Amfibol, Piroksin
	Mika-Fe(II), Klorit
	Feldspar
Sedang	Kuarsa
	Muskovit, liit
	Vermikulit, Klorit, Mika Dioktahedral,
	Montmorilonit
Tinggi	Kaolinit, Haloisit
	Gibsit, Alofan
	Gutit, Limonit, Hematit
	TiO ₂ , Zirkon, Korundum

*Diadaptasi dari Bohn dkk (1985), Sposito (1989)

Selain diakibatkan oleh sumber muatannya, perbedaan KTK berbagai padatan mineral dan bahan organik juga diakibatkan oleh luas permukaan aktifnya. Kaolinit dengan KTK yang lebih rendah daripada Vermikulit memiliki luas permukaan sebesar 10 – 50 m² per gram, lebih rendah daripada luas permukaan Vermikulit, yaitu 700 – 750 m² per gram. Smektit dan Humat, yang memiliki KTK lebih tinggi, masing-masing memiliki luas permukaan aktif sebesar 700 – 800 dan 500 – 800 m² per gram (Hillel, 1980).

d. Perubahan Sifat Tanah Lain

Muatan tanah yang diekspresikan dengan KTK bukan satu-satunya sifat tanah yang berkembang saat terjadi pembentukan tanah melalui berbagai proses pelapukan tanah. Perbedaan bahan induk, relief, iklim, organisme, dan waktu juga dapat mengakibatkan perubahan pada sifat-sifat tanah lainnya. Di antara sifat-sifat tanah tersebut adalah: warna, struktur, porositas, kecepatan infiltrasi, pH, kandungan basa-basa, kejenuhan basa, kejenuhan aluminium, kandungan C-organik dan N-Total, serta populasi dan aktivitas mikroorganisme tanah.

Kelima faktor pembentukan tanah di atas selalu bekerja bersamaan dan saling berinteraksi, sehingga mengakibatkan perubahan yang berbeda terhadap sifat-sifat tanah. Misalnya, seperti telah diungkapkan sebelumnya, bahan organik tanah memiliki pengaruh yang sangat besar terhadap sifat-sifat tanah. Selain menghitung warna tanah, bahan organik juga memperbaiki agregasi, struktur, dan porositas tanah. Pengaruh ini menyebabkan akibat berantai. Dengan membaiknya porositas tanah, proses infiltrasi dan perkolasi air akan berjalan sangat cepat. Bila temperatur tanah relatif tinggi, produksi ion H⁺ juga tinggi, pelapukan tanah akan berjalan lebih cepat karena produk pelapukan lebih mudah hilang dari sistem tanah akibat pencucian. Pelapukan tanah akan dipercepat bila curah hujan juga tinggi karena curah hujan tinggi akan memacu perkolasi air di dalam tubuh tanah yang membawa berbagai produk pelapukan mineral tanah.

Proses berantai di atas dapat menguras ion-ion basa dari lapisan atas tanah (topsoil) dan menumpuknya di lapisan tanah bawah (subsoil). Akibatnya, kejenuhan basa di topsoil menurun sedangkan kejenuhan aluminiumnya meningkat. Reaksi tanah (pH) juga dengan sendirinya akan menurun karena pH sangat dipengaruhi oleh kejenuhan basa. Proses ini akan mempercepat pelapukan di topsoil dan mempercepat perubahan sifat-sifat tanah lainnya (**Tabel 3.8**). Kehidupan mikroorganisme juga akan berubah. Menurunnya pH tanah akan mengakibatkan disequilibrium populasi dan aktivitas mikroorganisme tanah. Hal ini

karena, secara umum, jamur akan bertumbuh dan berkembang dengan baik dalam suasana asam sedangkan bakteri dalam suasana alkalin.

3.5 Hubungan Perkembangan Tanah dan Kesuburan Tanah

Proses perkembangan tanah sangat berpengaruh terhadap kesuburan tanah. Secara umum tanah berkembang melalui tahapan: Tanah Muda, Tanah Matang, dan Tanah Tua. Secara mineralogi (**Tabel 3.10**), **Tanah Muda** memiliki sumber unsur hara berupa mineral-mineral yang masih baru melapuk dan membebaskan unsur hara. Mineral-mineral tersebut mencakup Kalsit, Dolomit, Olivin, Piroksin, dan Feldspar. **Tanah Matang** merupakan tanah yang mengalami puncak perkembangan, mengandung mineral-mineral Muskovit, Vermikulit, Mika, dan Montmorilonit; sedangkan **Tanah Tua** mengandung mineral tertentu yang tidak memiliki unsur hara yang dapat dibebaskan untuk memenuhi kebutuhan tanaman, misalnya Kaolinit, Haloisit, atau oksida, hidoksida, dan hidroksioksida besi dan aluminium.

Secara kimia, sebagai konsekuensi dari kandungan mineralnya, tanah muda dan tanah matang memiliki pH netral, KTK dan KB dan basa relatif tinggi, P-tersedia relatif tinggi. Sebaliknya tanah tua memiliki pH relatif masam, KTK rendah, KB dan basa-basa rendah, dan P-tersedia rendah. Secara kimiawi, pemanfaatan tanah muda dan tanah matang akan relatif lebih mudah karena relatif tidak membutuhkan masukan unsur hara. Sebaliknya, menggunakan tanah tua untuk pertanian intensif mengharuskan masukan unsur hara dalam jumlah yang relatif besar. [~]

Daftar Pertanyaan Utama

1. Sebut dan jelaskan berbagai jenis bahan induk yang membentuk tanah!
2. Uraikan sifat-sifat dan jenis tanah yang dihasilkan dari tiga kelompok bahan induk dalam genesis tanah!

3. Apakah di Indonesia banyak terdapat bahan induk berupa deposit baru? Jelaskan sifat dan manfaatnya!
4. Apakah yang disebut dengan proses pelapukan?
5. Jelaskan pelapukan fisika! Bagaimana proses ini terjadi dan berikan contoh yang terjadi di lapangan!
6. Gambarkan kedahsyatan tiga jenis tenaga penghancur dalam pelapukan fisika: air, udara, dan panas!
7. Jelaskan pelapukan kimia! Bagaimana proses ini terjadi dan berikan contoh yang terjadi di lapangan!
8. Apakah peranan koloid liat dan humus tanah dalam terjadinya berbagai reaksi kimia di dalam sistem tanah? Jelaskan!
9. Jelaskan pelapukan biologis! Bagaimana proses ini terjadi dan berikan contoh yang terjadi di lapangan!
10. Jelaskan bagaimana makhluk hidup dapat memunculkan tenaga mekanik yang berperan dalam pelapukan tanah!
11. Bagaimanakah pengaruh aktivitas antropogenik dalam pelapukan mineral tanah?
12. Jelaskan hubungan antara pelapukan kimia dengan Konstanta Kesetimbangan (K)! Bagaimana menggunakannya untuk mempercepat atau memperlambat kecepatan proses pelapukan?
13. Jelaskan dan berikan contoh hubungan antara pelapukan kimia dengan pH tanah! Mengapa terjadi demikian?
14. Bagaimana peranan reaksi hidrolisis dan reaksi redoks dalam proses pelapukan kimia? Berikan masing-masing sebuah contoh!
15. Bagaimana pelapukan mineral tanah terjadi dengan melibatkan reaksi hidrasi?
16. Bagaimana pelapukan mineral tanah terjadi dengan melibatkan reaksi karbonasi?
17. Bagaimana pelapukan mineral tanah terjadi dengan melibatkan reaksi redoks?
18. Gambarkan horizonisasi profil tanah yang umum ditemui pada tanah tropika!
19. Bagaimanakah pengaruh pH dalam proses pembentukan tanah? Jelaskan!
20. Jelaskan bagaimana muatan negatif tanah berkembang dari berbagai sumber! Bagaimana hubungan antara muatan negatif tanah yang terbentuk dengan pH tanah?

21. Tanah berkembang dari mulai Tanah Muda, Tanah Matang, dan kemudian Tanah Tua. Jelaskan masing-masing jenis tanah tersebut dan kaitannya dengan kandungan mineral dalam masing-masing jenis tanah tersebut!
22. Bagaimanakah hubungan KTK tanah dengan perkembangan tanah?
23. Jelaskan bagaimana peranan masing-masing faktor pembentuk tanah dalam proses pelapukan tanah!
24. Bagaimana memanfaatkan proses pelapukan mineral tanah untuk mengelola tingkat kesuburan tanah?

“..... atau AIR-nya menjadi surut ke dalam TANAH, maka sekali-kali kamu tidak dapat menemukannya lagi” (QS Al-Kahfi [18]:41)

Bab IV: FISIKA TANAH

4.1 Komposisi Tanah

4.2 Sifat Fisika Tanah Utama

4.3 Dinamika dan Pengelolaan Sifat Fisika Tanah

Daftar Pertanyaan Utama

4.1 Komposisi Tanah

Seperti telah diungkapkan sebelumnya, tanah adalah bangunan empat dimensi (panjang, lebar, dalam, dan waktu) yang terdiri dari empat komponen (padatan, cairan, gas, dan mikroorganisme). Padatan tanah terdiri dari padatan mineral (padatan nir-organik) dan padatan nir-mineral (padatan organik). **Padatan mineral** terdiri dari partikel-partikel berukuran pasir, debu, dan liat dengan unsur penyusun utama Si, Al, dan O. Fraksi **pasir** dan **debu** berukuran kasar, tersusun oleh mineral-mineral primer pada tanah-tanah muda dan kuarsa pada tanah-tanah tua. Partikel pasir berukuran 0.05 mm – 2 mm, sedangkan partikel debu berukuran 0.002 – 0.05 mm (**Tabel 4.1**). Untuk kepentingan ilmu,

ukuran pasir dan debu dapat dibagi-bagi lagi menjadi Sangat Kasar, Kasar, Sedang, Halus, dan/atau Sangat Halus.

Tabel 4.1. Ukuran partikel tanah*.

Fraksi Tanah	Klasifikasi	Ukuran (mm)
Pasir	Sangat Kasar	1.000 – 2.000
	Kasar	0.500 – 1.000
	Sedang	0.250 – 0.500
	Halus	0.100 – 0.250
	Sangat Halus	0.050 – 0.100
Debu	Debu Kasar	0.005 – 0.050
	Debu Halus	0.002 – 0.005
Liat	Liat Kasar	0.2 μm – 0.002
	Liat Halus	< 0.2 μm

*Diadaptasi dari McKeague dkk. (1986); Singer dan Munns (1987); Harpstead dkk. (1988)

Pasir merupakan kerangka tanah dan mengakibatkan kestabilan struktur tanah bila saling diikat oleh liat, humus, dan/atau sesquioxida. Pasir murni tidak dapat saling berikatan, sehingga lebih mudah tererosi. Bila tererosi, fraksi pasir tidak tersuspensi tetapi bergerak di permukaan tanah dan akan diendapkan pada saat kecepatannya menurun. Untuk tanah tua, fraksi pasir pada umumnya tersusun oleh mineral kuarsa karena kuarsa merupakan mineral yang paling tahan terhadap proses pelapukan sehingga pelapukannya sangat lambat. Karena tersusun sebagian besar oleh kuarsa, fraksi pasir tanah tua tidak menyumbangkan unsur hara bagi tanaman. Mineral lain yang menyusun fraksi pasir secara perlahan dapat menyumbangkan unsur hara bagi tanaman. Untuk tanah muda, fraksi pasir terdiri dari mineral-mineral primer yang dapat menyumbangkan unsur hara untuk pertumbuhan dan perkembangan tanaman.

Secara mineralogi, fraksi debu sama dengan fraksi pasir, hanya ukurannya saja yang lebih kecil dan sulit dilihat dengan mata telanjang. Fraksi debu tanah tua tidak

banyak menyumbangkan unsur hara bagi tanaman karena fraksi debu juga tersusun oleh mineral kuarsa, kecuali bila fraksi debu masih mengandung mineral lain yang dapat menyumbangkan unsur hara. Sebaliknya, fraksi debu tanah muda masih mengandung mineral-mineral primer yang dapat menyumbangkan unsur hara. Karena ukurannya yang lebih kecil, fraksi debu dapat tersuspensi di dalam air yang bergerak cepat, namun akan segera mengendap bila kecepatan aliran air menurun.

Partikel **liat** berukuran lebih halus daripada partikel debu dan pasir. Fraksi liat secara mineralogi sangat berbeda dengan fraksi pasir dan fraksi debu. Sebagian besar mineral yang menyusun fraksi liat adalah mineral-mineral sekunder yang disebut mineral liat silikat, yang berkembang sebagai hasil rekombinasi hasil pelapukan berbagai jenis mineral primer di dalam fraksi pasir dan fraksi debu tanah yang lebih muda. Ukuran partikel liat adalah $\leq 2 \mu\text{m}$. Untuk kepentingan teori, ukuran liat juga dapat dibagi menjadi Sangat Kasar, Kasar, Sedang, Halus, dan/atau Sangat Halus. Karena ukurannya yang sangat halus, partikel liat di dalam tanah dapat bergerak melalui pori-pori tanah, berpindah antara lapisan di dalam tubuh tanah bersama perkolasi air, khususnya bila curah hujan cukup tinggi. Di dalam tanah ditemukan bahwa partikel liat dapat bergerak dari Horizon A ke Horizon B.

Padatan nir-mineral atau padatan organik terdiri dari butiran-butiran halus yang tersusun oleh unsur C, H, dan O. Bahan organik di dalam tanah berasal dari berbagai sumber, di antaranya sisa-sisa tanaman dan kotoran hewan, baik yang memasuki sistem tanah secara alami maupun karena faktor-faktor antropogenik. Sebagian dari bahan organik ini akan terdekomposisi dengan cepat, sebagian lagi akan terdekomposisi secara lambat. Sebagian dari bahan organik sulit terdekomposisi karena sangat resisten. Sisa bahan organik tanah yang telah resisten di dalam tanah disebut **Humus**.

Partikel-partikel pasir dan debu saling menyatu direkat oleh partikel-partikel liat, bahan organik, dan/atau oksida, hidroksida dan hidroksioksida membentuk agregat tanah (Barzegar dkk., 1997). Agregat tanah adalah suatu bangunan alami, di dalamnya terdapat **Pori Tanah** dengan berbagai ukuran yang diisi oleh air, udara, dan/atau mikroorganisme tanah. Keberadaan pori tanah, yang merupakan ruang-ruang di antara partikel-partikel tanah (**Pori Intraagregat**) atau di antara agregat tanah (**Pori Intraagregat**), ini memungkinkan terjadinya kehidupan biologi di dalam sistem tanah. Berbagai mikroorganisme dari kelompok aktinomisetes, jamur, dan bakteri hidup di dalam pori-pori tanah.

4.2 Sifat Fisika Tanah Utama

Menyatunya partikel-partikel tanah dengan berbagai ukuran membentuk agregat tanah berkaitan erat dengan berbagai sifat dan proses fisika yang terjadi di dalam tanah. Di antara berbagai sifat fisika tanah penting yang berkaitan dengan terbentuknya agregat tanah adalah: Tekstur Tanah, Struktur Tanah, Pori dan Porositas Tanah, Kerapatan Isi dan Kerapatan Partikel Tanah, Kadar Air Tanah, Warna Tanah, dan Temperatur Tanah. Di antara proses penting yang terjadi berkaitan dengan terbentuknya agregat tanah adalah: pemadatan tanah, pengolahan tanah, infiltrasi, perkolasi, penyimpanan dan kehilangan air tanah, dan drainase.

Sifat-sifat dan proses-proses fisika di atas sangat penting untuk difahami dalam pengelolaan tanah. Dengan pemahaman ini kita diharapkan dapat menerapkan manfaatnya di lapangan. Misalnya, untuk mengatasi proses pencucian basa-basa di dalam sistem tanah, yang dapat menurunkan tingkat kesuburan tanah, diperlukan pemahaman terhadap apa dan bagaimana terjadinya proses infiltrasi dan perkolasi di dalam sistem tanah. Bila dengan suatu alasan suatu jenis tanah diolah, maka kita harus memahami bahwa kegiatan tersebut akan meningkatkan porositas tanah. Meningkatnya porositas tanah akan memudahkan terjadinya infiltrasi air. Meningkatnya porositas tanah juga meningkatkan laju perkolasi air, yang dapat membawa berbagai unsur atau senyawa larut di dalam air yang bergerak mengikuti gerakan air perkolasi; proses ini disebut **Pencucian** (*Leaching*). Tergantung pada kehendak kita, laju infiltrasi dan laju perkolasi bisa dikelola agar lebih cepat atau lebih lambat. Untuk menghindari proses pencucian berlebihan, porositas tanah harus dibatasi. Sebaliknya, bila kita menginginkan terjadinya proses pencucian secara intensif, maka porositas tanah harus dinaikkan.

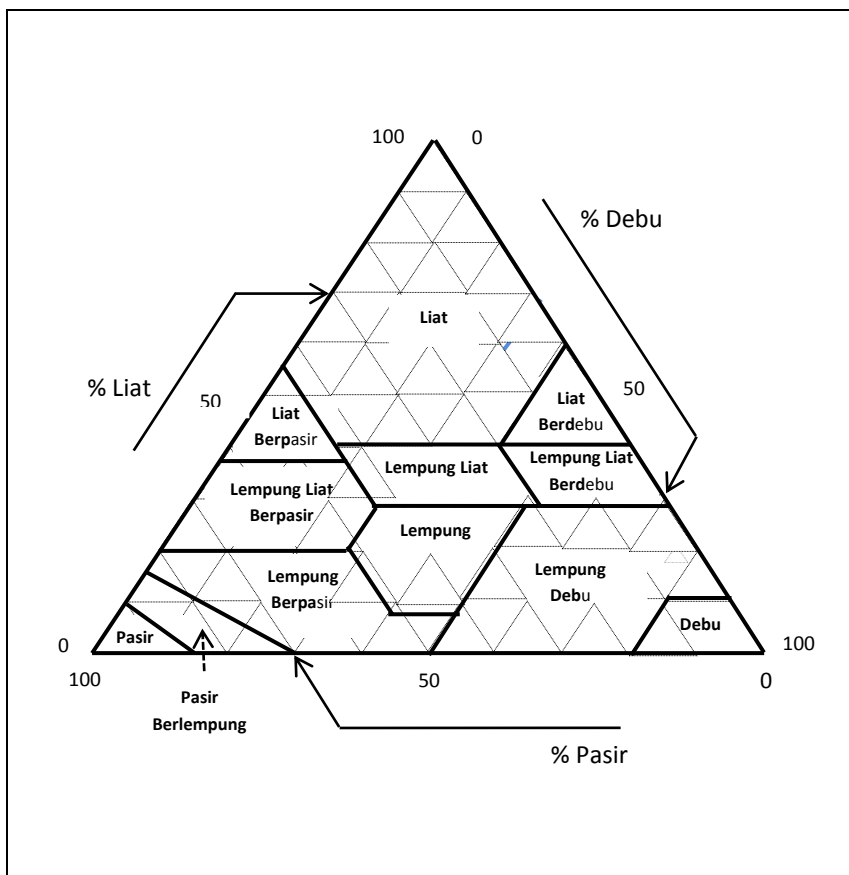
a. Tekstur Tanah

Tekstur Tanah adalah perbandingan relatif persentase fraksi pasir, fraksi debu, dan fraksi liat di dalam sistem tanah, yang juga menggambarkan tingkat kekasaran atau kehalusan suatu jenis tanah. Setiap jenis tanah memiliki persentase pasir, debu, dan liat tersendiri. Ada tanah yang didominasi oleh fraksi pasir sehingga memiliki tekstur Pasir. Ada tanah yang didominasi oleh fraksi debu sehingga memiliki tekstur Debu. Ada juga tanah yang memiliki tekstur Liat karena tanah ini didominasi oleh fraksi liat. Sebagian tanah juga memiliki tekstur tertentu dengan

Abdul Kadir Salam – 2020

suatu fraksi cukup signifikan. Dengan alasan ini, ada tanah dengan tekstur berpasir, berdebu, atau berliat. Misalnya, tanah Lempung Berpasir, Lempung Berdebu, atau Lempung Berliat.

Kelas tekstur tanah dapat ditetapkan di laboratorium dengan menggunakan **Hidrometer** atau di lapang dengan menggunakan **indera 'perasaan'**. Pengukuran di laboratorium akan memunculkan angka persentase pasir, debu, dan liat. Angka-angka ini kemudian digunakan untuk menetapkan kelas tekstur tanah dengan menggunakan segitiga tekstur, misalnya yang dibuat oleh *United States Department of Agriculture (USDA)* (**Gambar 4.1**).



Gambar 4.1. Segitiga Tekstur untuk menetapkan kelas tekstur tanah (Singer dan Munns, 1987).

Sebagai contoh, penetapan kelas tekstur sebuah tanah dengan menggunakan Segitiga Tekstur dengan data hidrometer pasir 50% dan debu 20% dapat dilakukan dengan menentukan sebuah titik pada sisi pasir dengan kandungan pasir 50% dan menarik garis sejajar dengan garis skala debu dan menentukan titik debu pada kandungan debu 20% pada sisi debu dan menarik garis lurus sejajar dengan garis skala liat. Kedua garis akan berpotongan pada suatu titik dengan label kelas tekstur tertentu, yaitu Lempung Liat Berpasir, yang menunjukkan kelas tekstur tanah tersebut. Dengan demikian, kita dapat mengetahui kelas tekstur tanah tersebut dengan mudah menggunakan Segitiga Tekstur.

Segitiga Tekstur adalah sebuah diagram untuk menetapkan tekstur tanah (**Gambar 4.1**). Pada segitiga tekstur terdapat 3 sisi segitiga sama-sisi. Pada setiap sisi terdapat label yang menunjukkan fraksi tanah dengan skala 0 – 100% untuk masing-masing fraksi, yaitu: fraksi pasir, fraksi debu, dan fraksi liat. Pada bagian dalam segitiga tekstur terdapat garis-garis pembagi antara kelas tekstur. Keseluruhan jenis kelas tekstur terdiri dari 12 buah (**Tabel 4.2**).

Tabel 4.2. Jenis kelas tekstur tanah.

No.	Kelas Tekstur
1	Liat (<i>Clay</i>)
2	Liat Berdebu (<i>Silty Clay</i>)
3	Liat Berpasir (<i>Sandy Clay</i>)
4	Debu (<i>Silt</i>)
5	Pasir (<i>Sand</i>)
6	Pasir Berlempung (<i>Loamy Sand</i>)
7	Lempung (<i>Loam</i>)
8	Lempung Liat (<i>Clay Loam</i>)
9	Lempung Liat Berdebu (<i>Silty Clay Loam</i>)
10	Lempung Liat Berpasir (<i>Sandy Clay Loam</i>)
11	Lempung Debu (<i>Silt Loam</i>)
12	Lempung Berpasir (<i>Sandy Loam</i>)

Di lapangan, tekstur tanah dapat ditentukan secara kualitatif dengan menggunakan ‘perasaan’ **indra peraba**. Persentase fraksi pasir ditentukan dengan perasaan kasar di antara jari dan menduga kuantitas partikel kasarnya yang terlihat jelas; persentase debu ditentukan dengan perasaan halus seperti bedak tapi tidak lengket pada tanah lembab di antara jemari tangan; sedangkan persentase fraksi liat dapat ditentukan dengan “perasaan” lengket di antara jemari atas tanah yang telah dibasahi; tanah juga dapat dibuat membentuk pita. Namun demikian, keberadaan humus di dalam tanah dapat menyesatkan ‘perasaan’ kita; tanah berpasir akan terasa lebih halus; sebaliknya, tanah liat akan terasa lebih kasar. Oleh karena itu, dalam penentuan distribusi ukuran partikel tanah, bahan ini harus dihancurkan terlebih dahulu.

Penetapan kelas tekstur dengan ‘perasaan’ di lapang bersifat subjektif dan cenderung tidak akurat. Oleh karena itu, hasilnya harus diverifikasi dengan hasil penetapan di laboratorium. Namun dengan latihan yang cukup, seorang ahli tanah dapat menetapkan kelas tekstur tanah dengan akurat, hasil penetapannya mendekati atau sama dengan hasil penetapan di laboratorium.

Dalam jangka pendek kelas tekstur tanah tidak berubah, khususnya bila proses perkembangan tanah berjalan relatif lambat. Namun demikian, dengan berjalannya waktu tekstur tanah dapat berubah sebagai akibat dari terus berlangsungnya proses pelapukan tanah. Fraksi pasir dan debu yang menyimpan mineral primer akan mengalami pelapukan sehingga menjadi mineral sekunder atau mineral liat. Akibatnya, terjadi perubahan komposisi fraksi pasir, debu, dan liat. Dalam jangka pendek, kelas tekstur juga dapat berubah sebagai akibat masuknya anasir-anasir dari luar sistem tanah yang bersifat masif. Misalnya, tanah berliat dapat berubah menjadi tanah berpasir karena masukan partikel-partikel pasir secara masif akibat ledakan gunung berapi, seperti yang terjadi di wilayah sekitar G. Galunggung atau G. Merapi sesaat setelah letusan gunung terjadi.

b. Struktur Tanah

Bersatunya fraksi pasir, fraksi debu, dan fraksi liat membentuk bangunan tiga dimensi dalam bentuk agregat mengakibatkan terjadinya struktur tanah. Dalam pembentukan struktur tanah, fraksi pasir dan debu berfungsi sebagai kerangka sedangkan fraksi liat, humus, dan/atau sesquioksida berfungsi sebagai perekat yang menyatukan fraksi pasir dan fraksi debu. Keberadaan liat, humus, dan sesquioksida tanah mengakibatkan struktur tanah menjadi lebih mantap sehingga lebih tahan

terhadap kekuatan fisik yang menekan, misalnya energi kinetik butiran air hujan. Selain sebagai perekat partikel-partikel tanah, humus juga menyebabkan partikel – partikel tanah yang didominasi debu dan pasir menjadi tidak padat bila diolah secara berulang. Secara umum terdapat beberapa jenis struktur tanah yang berkembang di dalam tanah, yang dapat dibedakan berdasarkan bentuknya: Bulat, Lempeng, Kubus, Prismatik, dan Silinder (**Tabel 4.3**).

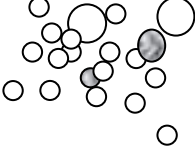

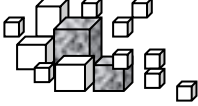
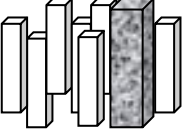
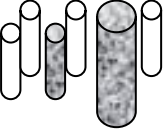
c. Pori dan Porositas Tanah

Ketika partikel-partikel pasir, debu, dan liat menyatu membentuk sebuah agregat tanah, akan terbentuk rongga-rongga di antara partikel tanah yang tidak ditempati oleh padatan tanah. Rongga-rongga di antara partikel tanah ini disebut **Pori Tanah (Gambar 4.2)**. Dari segi letaknya, pori tanah terdiri dari dua jenis, yaitu Pori Intraagregat dan Pori Interagregat. **Pori Intraagregat** adalah rongga-rongga di dalam tanah yang terletak di antara partikel-partikel tanah yang menyusun agregat tanah; sedangkan **Pori Intraagregat** adalah rongga-rongga di dalam tanah yang terletak di antara agregat tanah. Pori tanah diisi oleh air, udara, dan mikroorganisme. Selain itu, di dalam pori-pori tanah inilah akar tanaman bertumbuh dan berkembang serta menyerap air dan unsur hara untuk memenuhi keperluan tanaman. Dengan demikian, kedudukan dan peranan pori tanah sangat penting bagi pertumbuhan dan perkembangan tanaman.

Pori tanah terdiri dari berbagai ukuran. Secara kualitatif, pori tanah dibagi menjadi tiga kelompok: pori mikro, pori meso, dan pori makro. Secara teori, dalam keadaan normal (Kapasitas Lapang), air menempati pori mikro dan sebagian pori meso, sedangkan udara mengisi sebagian pori meso dan pori makro. Dalam keadaan basah, misalnya pada saat dan setelah hujan, seluruh pori diisi oleh air. Udara yang sebelumnya mengisi pori tanah terdesak ke luar dari pori tanah. Sebaliknya dalam keadaan kering seluruh pori tanah berisi udara. Keberadaan air dan udara di dalam pori tanah sangat dinamis, sehingga berubah dari waktu ke waktu dipengaruhi oleh keberadaan air tanah (**Gambar 4.3**).

Pori-pori tanah dapat saling berhubungan membentuk sebuah saluran seperti sebuah pipa di dalam tubuh tanah (**Gambar 4.4**). Saluran ini menjulur tidak beraturan menuju segala arah dan merupakan jalan bagi air tanah untuk bergerak secara kapiler (dalam keadaan kering) atau difusi (dalam keadaan basah). Saluran ini juga merupakan jalan bagi difusi gas antara udara tanah dan udara atmosfer.

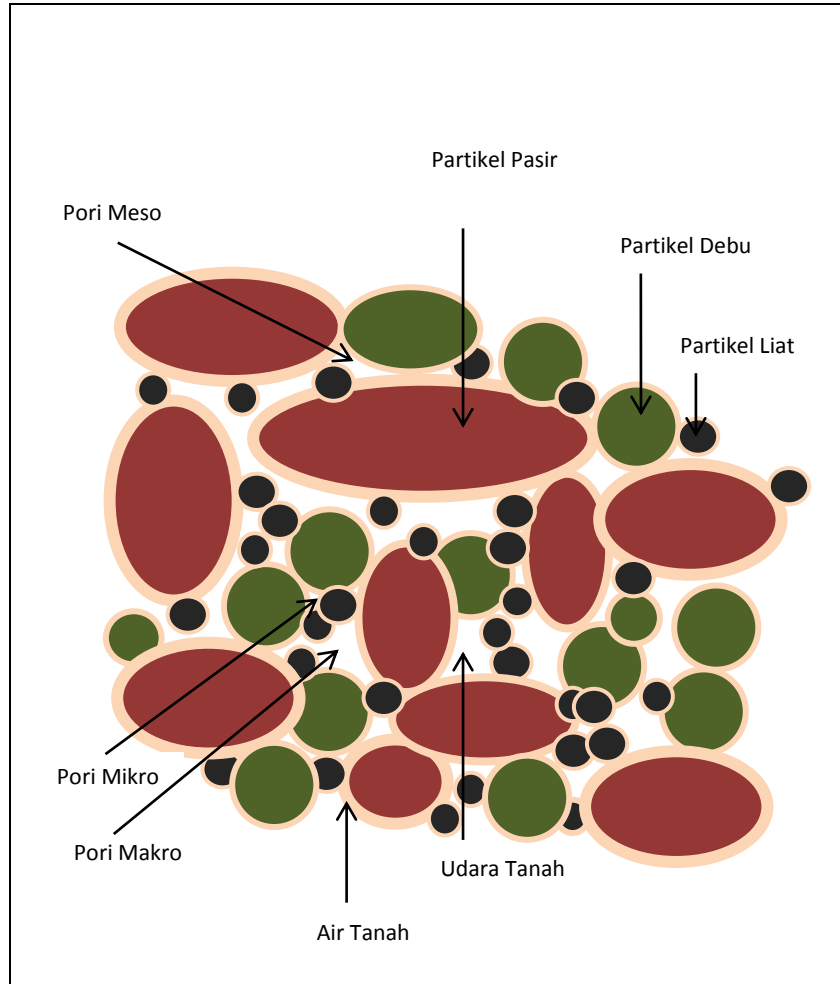
Tabel 4.3. Jenis struktur tanah*.

Satuan Struktur	Nama	Sifat dan Tempat
	Bulat (<i>Granular</i>)	Berwarna Gelap; Lapisan Atas
	Lempeng (<i>Platy</i>)	Berwarna Pucat; Lapisan Bawah
	Kubus (<i>Blocky</i>)	Lapisan Bawah (Kaya Liat), khususnya Tanah Hutan
	Prismatik (<i>Prismatic</i>)	Padang Rumput; Lapisan Bawah
	Kolumnar (<i>Columnar</i>)	Padang Rumput; Lapisan Bawah (dipengaruhi oleh Na)

*Harpstead dkk. (1988)

Panjang saluran bervariasi, dapat panjang dapat pula pendek. Bisa saja antara dua buah saluran memiliki jarak lurus yang sama namun panjang salurannya berbeda. Hal ini tergantung pada kekelokan pori-pori tanah yang saling berhubungan. Kekelokan (*Tortuosity*) ini akan menentukan kecepatan pergerakan air dan unsur hara dari satu titik ke titik yang lain di dalam tanah melalui aliran

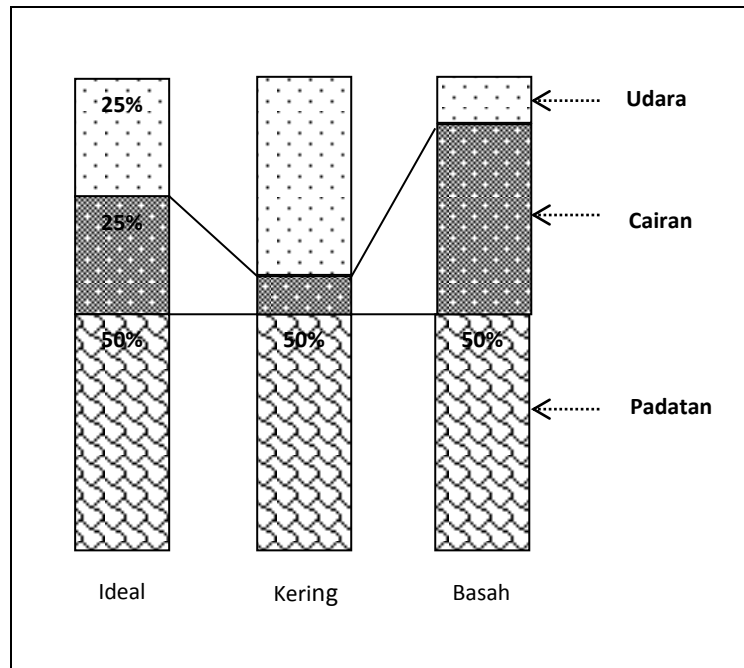
massa atau difusi. Air dan unsur hara akan bergerak lebih lambat bila kekelokan yang dimaksud sangat tinggi.



Gambar 4.2. Gambaran hipotetik pori tanah.

Pori dan saluran pori tanah dapat juga terbentuk bukan karena agregasi alami. Makhluk hidup seperti cacing tanah, semut, tikus, dan marmut juga membentuk

pori dan saluran pori. Umumnya pori dan saluran pori yang dibuat oleh agen ini berukuran lebih besar. Pori dan saluran pori tanah yang terbentuk dapat mempercepat proses infiltrasi dan perkolasi air ke dalam tanah. Teknologi biopori yang sekarang banyak diterapkan di perkotaan untuk mengatasi kekurangan air dan menghindari bahaya banjir didasarkan pada mekanisme seperti ini.



Gambar 4.3. Dinamika perubahan volume air dan udara tanah.

Penjelasan di atas menunjukkan bahwa keberadaan pori di dalam sistem tanah sangat penting. Namun demikian, keberadaan ini tidak hanya menyangkut jenis dan ukuran pori saja, namun juga menyangkut total pori yang berada di dalam sistem tanah. Perbandingan antara volume pori dengan volume total tanah disebut **Porositas Total Tanah**. Porositas total tanah dapat berkisar antara 0% untuk tanah dengan struktur masif sampai relatif tinggi pada tanah porus yang baru diolah. Semakin tinggi porositas total tanah umumnya akan mengakibatkan semakin tingginya kemampuan tanah untuk menyimpan air tanah. Namun demikian, **Distribusi Ukuran Pori** sering lebih penting ketimbang Porositas Total, sebab tidak semua pori tanah dapat mengikat air dengan baik. Air umumnya menempati pori

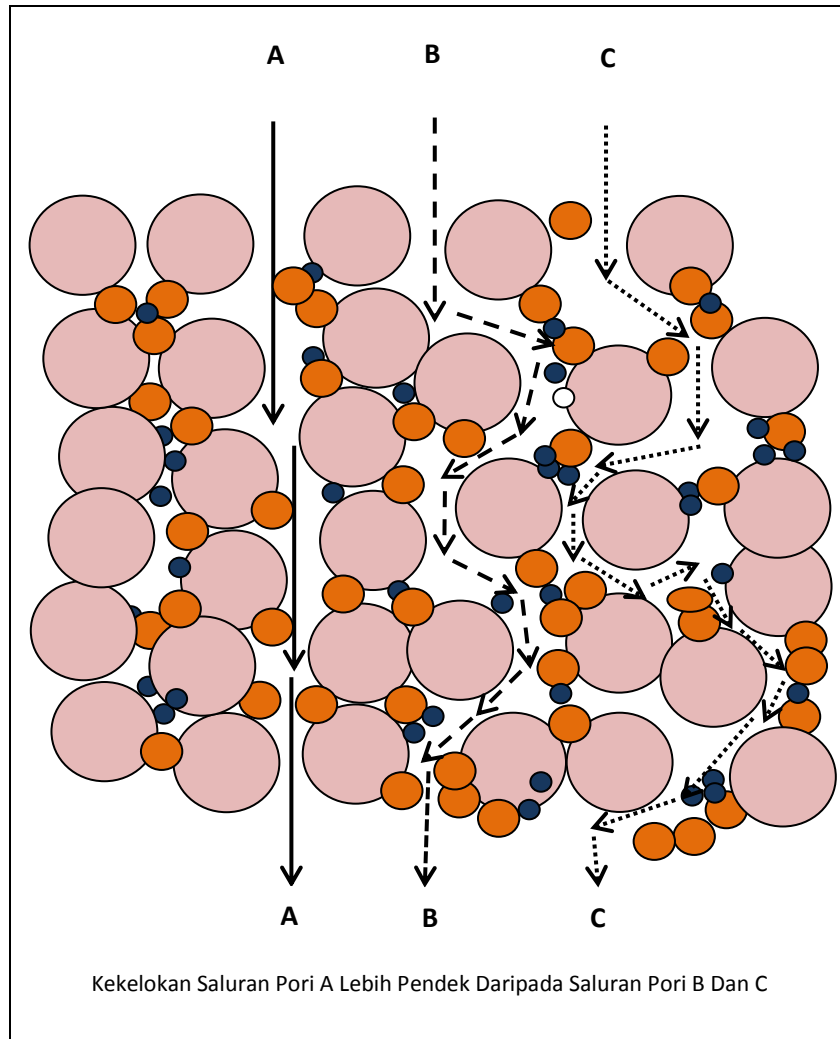
Abdul Kadir Salam – 2020

mikro dan pori meso. Air yang berada di dalam pori makro bersifat sementara dan akan mengalir sebagai air gravitasi.

Porositas total tanah dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut (Hillel, 1980; Singer dan Munns, 1987):

$$P_t = \frac{V_p}{V_t} \dots\dots \text{Pers. 4.1}$$

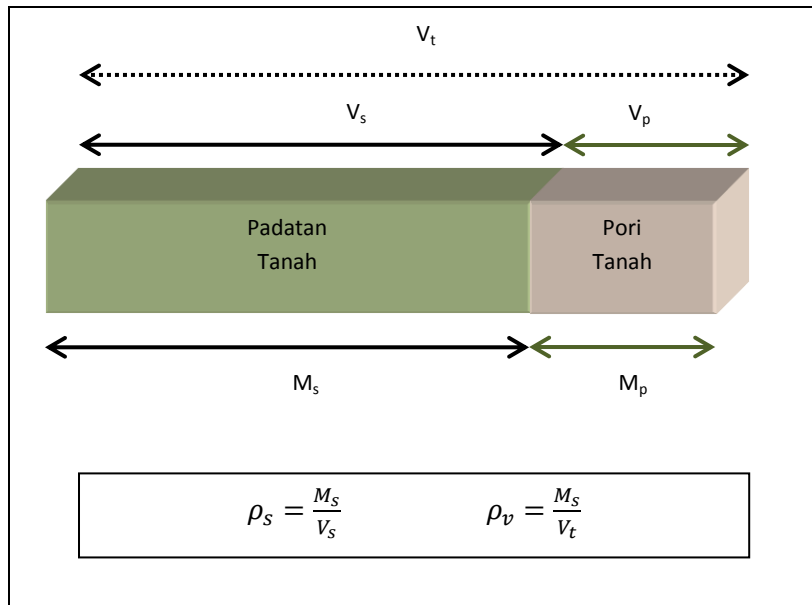
atau



Gambar 4.4. Saluran pori dan kekelokannya.

$$P_t = \frac{V_a + V_w}{V_s + V_a + V_w} \dots\dots \text{Pers. 4.2}$$

dengan P_t adalah porositas total tanah, V_p adalah volume tanah berupa pori-pori, V_t adalah volume total tanah, V_a adalah volume tanah berisi udara, V_w adalah volume tanah berisi air, dan V_s adalah volume padatan tanah (**Gambar 4.5**).



Gambar 4.5. Perhitungan kerapatan isi dan kerapatan partikel tanah.

d. Kerapatan Isi dan Kerapatan Partikel Tanah

Porositas berkaitan dengan Kerapatan Isi tanah, tetapi tidak berkaitan dengan Kerapatan Partikel tanah. **Kerapatan Isi** (*Bulk Density*) adalah perbandingan antara Massa Partikel Tanah dengan Volume Total tanah (**Gambar 4.5**). Secara

matematika, formula untuk menghitung Kerapatan Isi adalah sebagai berikut (Hillel, 1980; Singer dan Munns, 1987):

$$\rho_b = \frac{M_p}{V_t} \quad \dots\dots \text{Pers. 4.3}$$

dengan ρ_b adalah Kerapatan Isi, M_p adalah massa partikel tanah, dan V_t adalah volume total tanah. V_t adalah juga volume tanah (V_s) ditambah volume pori tanah (V_p) (**Gambar 4.5**). Kerapatan isi dapat diekspresikan dalam satuan g per cm^{-3} . Kerapatan isi tanah mineral pada umumnya berkisar pada angka 1.3 g cm^{-3} .

Kerapatan isi tanah berkaitan dengan porositas tanah. Bila tanah mengalami pemadatan, misalnya karena penggunaan traktor di lahan pertanian, jumlah ruang pori tanah berkurang, dan berat tanah per satuan volumenya bertambah. Sebaliknya, bila ruang pori tanah bertambah misalnya karena pengolahan tanah maka berat tanah per satuan volume atau kerapatan isinya menurun.

Kerapatan Partikel tanah (*Particle Density*) adalah perbandingan antara berat tanah dibagi volume total tanah (**Gambar 4.5**). Secara matematika Kerapatan Partikel Tanah dapat dihitung sebagai berikut (Hillel, 1980; Singer dan Munns, 1987):

$$\rho_s = \frac{M_t}{V_s} \quad \dots\dots \text{Pers. 4.4}$$

dengan ρ_s adalah Kerapatan Partikel Tanah, M_t adalah massa tanah, dan V_s adalah volume padatan tanah. V_s hanya mencakup volume tanah yang ditempati oleh padatan tanah (**Gambar 4.5**).

Untuk tanah mineral, kerapatan isi berkisar pada rata-rata $1.3\text{-}1.35 \text{ g cm}^{-3}$ dan kerapatan partikel sekitar $2.6\text{-}2.7 \text{ g cm}^{-3}$. Kerapatan Isi selalu lebih rendah daripada Kerapatan Partikel tanah; semakin tinggi porositas tanah akan semakin jauh perbedaan antara ρ_s dan ρ_v . Untuk tanah dengan komposisi pori tanah sekitar 50% dari volume tanah, maka $\rho_v = 0.5 \rho_s$. Pada tanah berpasir, ρ_v dapat mencapai 1.6 g cm^{-3} , untuk tanah lempung yang teragregasi dengan baik dan tanah liat dapat memiliki $\rho_v 1.1 \text{ g cm}^{-3}$. Rendahnya nilai ρ_v ini diakibatkan oleh tingginya volume tanah berupa pori atau porositas tanah. Sebaliknya, tanah yang tidak memiliki ruang pori atau tanah masif memiliki $\rho_v = \rho_s$.

Seperti telah diungkapkan, kerapatan isi tanah bersifat dinamik, tergantung pada porositas tanah. Tanah yang baru saja diolah akan memiliki kerapatan isi lebih rendah, sebaliknya tanah yang telah mengalami pemadatan memiliki kerapatan isi lebih tinggi. Sebaliknya, kerapatan partikel tanah relatif stabil, kecuali

bila ke dalam tanah diintroduksi padatan lain yang memiliki berat jenis berbeda dengan kerapatan partikel tanah.

Dengan menggunakan formula untuk menghitung ρ_v dan ρ_s , maka porositas total (f) tanah dapat dihitung dengan formula berikut (Hillel, 1980):

$$f = (\rho_s - \rho_v) / \rho_s \dots\dots \text{Pers. 4.5}$$

$$f = 1 - \rho_v / \rho_s \dots\dots \text{Pers. 4.6}$$

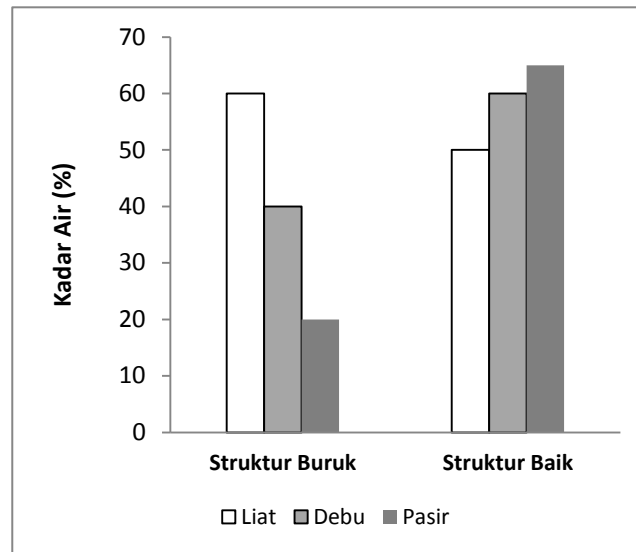
Nilai porositas total berada pada rentang 0-1 atau 0-100%. Tanah berpasir dengan kerapatan isi antara 1.5-1.7 g cm⁻³ memiliki porositas total antara 0.43 – 0.36 atau 43-36%. Tanah liat dengan kerapatan isi 1.1-1.3 g cm⁻³ memiliki porositas total 58-51%.

e. Kadar Air dan Konsistensi Tanah

Seperti diungkapkan sebelumnya, air di dalam tanah akan disimpan di dalam pori tanah, khususnya yang berukuran mikro dan meso. Oleh karena itu, kadar air tanah tergantung pada jenis pori. Kapasitas menyimpan air tanah akan semakin baik bila tanah mengandung pori mikro dan pori meso dengan jumlah yang cukup banyak. Faktor-faktor yang memengaruhi ukuran pori tanah seperti tekstur dan struktur tanah dan porositas total tanah dengan sendirinya sangat memengaruhi kadar air tanah.

Dengan demikian, dapat diduga bahwa tanah berliat akan memiliki kadar air lebih tinggi daripada tanah berdebu, dan tanah berdebu akan memiliki kadar air lebih tinggi daripada tanah berpasir. Asumsi yang digunakan adalah bahwa jumlah pori mikro dan meso akan menurun dengan urutan: Tanah Liat > Tanah Debu > Tanah Pasir.

Namun demikian, urutan di atas bisa saja berubah sebagai akibat kualitas agregasi tanah, yang memengaruhi struktur tanah. Tanah liat dengan struktur yang baik bisa saja memiliki jenis pori makro lebih dominan sehingga daya ikatnya terhadap air menurun karena sebagian air lebih mudah terdrainase. Demikian juga dengan tanah berdebu, dengan agregasi yang baik dapat memiliki pori makro lebih tinggi. Akibatnya, kadar air di dalam tanah dapat berubah menjadi: Tanah Pasir > Tanah Debu > Tanah Liat. Perubahan kadar air akibat agregasi tanah diperlihatkan pada **Gambar 4.6**.



Gambar 4.6. Perubahan kadar air akibat perbedaan tekstur dan struktur tanah.

Selain oleh faktor tekstur dan struktur tanah, kadar air tanah juga dipengaruhi oleh faktor porositas tanah. Bila pori mikro mendominasi, kadar air tanah akan meningkat dengan meningkatnya porositas total tanah karena akan lebih banyak pori yang dapat mengikat air tanah. Sebaliknya, kadar air tanah akan menurun dengan meningkatnya porositas tanah bila pori makro tanah mendominasi. Sebagian besar air akan terdrainase dalam bentuk air gravitasi.

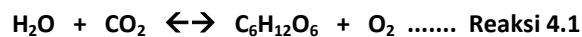
Kadar air tanah berpengaruh terhadap **Konsistensi Tanah**. Konsistensi tanah menunjukkan sifat kerasnya tanah pada saat kering, keremahannya bila lembab, dan kelengketan atau elastisitasnya bila basah (Singer dan Munns, 1987). Konsistensi tanah berbeda antarjenis tanah, berkaitan terutama dengan kadar air dan tekstur tanah.

Selain pengaruh di atas, air tanah juga memiliki beberapa manfaat. Pertama, air adalah bahan dasar untuk proses fotosintesis di dalam tanaman hijau bersama dengan gas CO_2 . Kedua, air penting bagi perkembangan mikroorganisme tanah yang melakukan dekomposisi bahan organik. Ketiga, air juga penting dalam proses pelapukan mineral tanah, yang membebaskan unsur hara yang diperlukan oleh tanaman. Dalam pelapukan mineral tanah, air bertindak baik sebagai media reaksi

Abdul Kadir Salam – 2020

maupun sebagai reaktan. Keempat, air juga bermanfaat sebagai media gerak unsur hara melalui aliran massa dan difusi menuju permukaan serap akar tanaman. Karena air mempunyai peranan penting dalam pergerakan unsur hara menuju akar tanaman, kadar air juga menunjukkan teknik pemupukan yang sesuai untuk diterapkan bagi setiap jenis unsur hara. Selain itu, kadar air tanah juga sangat menentukan penetapan jadwal penanaman, misalnya waktu membajak, menanam, menyemprot, memupuk, dll.

Setiap tanaman memiliki kebutuhan yang berbeda terhadap air (**Tabel 4.4**). Terlepas dari jenis tanaman tersebut, air di dalam tanaman digunakan untuk membuat gula sederhana melalui proses fotosintesis (**Reaksi 4.1**).



Dalam fotosintesis, H_2O terurai menjadi H dan O. Hidrogen yang dibebaskan berkombinasi dengan CO_2 membentuk gula sederhana dan O (dalam bentuk O_2) dibebaskan ke atmosfer melalui stomata.

Tabel 4.4. Jenis tanaman berdasarkan kebutuhan airnya.

Jenis Tanaman	Jumlah Kebutuhan Air
Hidrofit	Banyak
Mesofit	Sedang
Xerofit	Sedikit

Namun demikian, hanya sebagian kecil H_2O atau sekitar < 1% dari air yang diserap oleh tanaman digunakan dalam proses fotosintesis. Jumlah ini juga tergantung pada jenis tanaman. Manfaat utama air adalah untuk mengangkut unsur hara dan senyawa tanaman baik ke bagian atas dari akar tanaman (melalui *xylem*) maupun dari atas ke bagian bawah tanaman (melalui *floem*).

f. Warna Tanah

Warna Tanah adalah salah satu sifat tanah yang kasat mata. Terkadang kita dapat mengetahui sifat-sifat umum tanah berdasarkan warna tanah. Misalnya,

Abdul Kadir Salam – 2020

warna hitam Horizon O dan/atau Horizon A tanah menunjukkan bahwa tanah tersebut subur dan karenanya dianggap dapat menyediakan berbagai jenis unsur hara yang dibutuhkan oleh tanaman untuk pertumbuhan dan perkembangannya. Selain itu, kita juga tahu bahwa warna hitam dari tanah tersebut diakibatkan oleh bahan organik yang disumbangkan oleh vegetasi yang tumbuh di atasnya. Sebaliknya, bila kita melihat tanah berwarna merah maka kita akan menganggap bahwa tanah tersebut telah tua dan tidak produktif lagi. Warna merah menunjukkan bahwa tanah didominasi oleh mineral sekunder berupa oksida atau hidroksida besi, yang menunjukkan fase akhir dari perkembangan tanah.

Warna tanah sangat ditentukan oleh kuantitas humus dan bentuk kimia Fe di dalam tanah. Bila humus di dalam tanah terdapat dalam kuantitas tinggi, tanah berwarna hitam. Tanah merah menunjukkan bahwa drainase baik, Fe teroksidasi dan tidak terhidrasi. Besi terdapat dalam keadaan teroksidasi (Fe^{3+}) misalnya sebagai mineral sekunder hematit (Fe_2O_3) yang berwarna merah. Warna kuning menunjukkan bahwa Fe terhidrasi dan kadang-kadang oksidasi terjadi dalam jumlah rendah. Besi dalam bentuk teroksidasi dan terhidrasi, misalnya dalam bentuk mineral sekunder limonit ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) yang berwarna kuning coklat. Warna kelabu menunjukkan bahwa tanah selalu tergenang dan kekurangan oksigen sehingga besi berada dalam keadaan tereduksi (Fe^{2+}) (**Tabel 4.5**). Dalam tanah yang kadang-kadang basah dan kadang-kadang kering, selain berwarna abu-abu (di daerah yang tereduksi) terlihat juga becak-becak merah atau kuning, yaitu di bagian O_2 dapat masuk, yang menyebabkan terjadinya oksidasi Fe. Dari penjelasan ini terlihat jelas bahwa warna tanah sangat ditentukan oleh tiga faktor, yaitu: (1) jenis mineral dan jumlahnya, (2) kandungan bahan organik tanah, dan (3) kadar air tanah dan tingkat hidrasi.

Namun demikian, untuk **menetapkan warna tanah** hanya berdasarkan pandangan kasat mata saja bisa menyesatkan karena kemampuan mata manusia tidak standar. Oleh karena itu, kita memerlukan warna standar sebagai pembanding. Untuk menentukan warna secara cerdas dan standar, kita dapat menggunakan **Munsell Soil Color Chart**, yang banyak digunakan dalam ilmu tanah modern. Dengan menggunakan *Munsell Soil Color Chart*, penetapan warna tidak bersifat subyektif, tetapi didasarkan pada warna yang telah dibakukan. *Munsell Soil Color Chart* terdiri dari tiga sifat warna, yaitu: *Hue*, *Value*, dan *Chroma* (Harpstead dkk.,1988). **Hue** adalah warna dominan sesuai dengan panjang gelombangnya. **Value** menunjukkan derajat terangnya warna sesuai dengan banyaknya sinar yang dipantulkan. **Chroma** menunjukkan kemurnian atau kekuatan dari warna atau gradasi kemurnian dari warna atau derajat pembeda adanya perubahan warna dari kelabu atau putih netral ke warna lainnya.

Tabel 4.5. Penyebab beberapa warna tanah.

Warna	Penyebab
Hitam	Humus tanah sangat tinggi
Merah	Fe teroksidasi, tidak terhidrasi
Kuning	Fe teroksidasi sedikit; terhidrasi
Kelabu	Tanah tergenang; oksigen rendah sehingga Fe tereduksi

Hue dibedakan menjadi 10 warna, yaitu: (1) Y (Kuning), (2) YR (Kuning - Merah), (3) R (Merah), (4) RP (Merah - Ungu), (5) P (Ungu), (6) PB (Ungu - Coklat), (7) B (Coklat), (8) BG (Coklat - Kelabu), (9) G (Kelabu), dan (10) GY (Kelabu - Kuning). Setiap warna ini dibagi menjadi beberapa kisaran: (1) Hue = 0 – 2,5; (2) Hue = 2,5 – 5,0; (3) Hue = 5,0 – 7,5; (4) Hue = 7,5 – 10; yang dalam *Munsell Soil Color Chart* ditulis: 2,5 ; 5,0 ; 7,5 ; dan 10.

Value dibedakan dari 0 sampai 8; yang makin tinggi menunjukkan makin terangnya warna (makin banyak sinar yang dipantulkan). Dalam *Munsell Soil Color Chart* angka ini terbentang secara vertikal dari bawah ke atas dengan urutan nilai 2; 3; 4; 5; 6; 7; dan 8. Angka 2 menunjukkan derajat warna paling gelap dan angka 8 paling terang.

Chroma juga diekspresikan dari angka 0 sampai angka 8, yang menunjukkan kemurnian atau kekuatan warna yang makin meningkat. Dalam *Munsell Soil Color Chart* angka ini disajikan dengan secara horizontal dari kiri ke kanan dengan urutan nilai: 1, 2, 3, 4, 6, dan 8. Angka 1 menunjukkan warna tidak murni dan angka 8 menunjukkan warna paling murni.

Perekaman warna tanah dengan menggunakan *Munsell Soil Color Chart*, dapat dilakukan dengan contoh seperti tertera pada **Tabel 4.6**. Dengan menggunakan cara ini, warna tanah dapat diekspresikan dan dikomunikasikan dengan mudah melalui sebuah cara baku yang dapat difahami oleh setiap orang.

Tabel 4.6. Contoh rekaman warna tanah.

No.	Rekaman	<i>Hue</i>	<i>Value</i>	<i>Chroma</i>	Warna
1	7,5 YR 5/4	7.5 YR	5	4	Coklat
2	10 R 4/6	10 R	4	6	Merah
3	10 YR 3/2	10 YR	3	2	Coklat

Bila untuk suatu tanah di lapang ditemukan dengan beberapa warna, semua warna harus disebutkan dengan menyebutkan juga warna tanah yang dominan. Warna tanah juga berbeda tergantung pada kadar airnya: basah, lembab, atau kering. Oleh karena itu, dalam menentukan warna tanah perlu dicatat apakah warna tanah ditetapkan dalam keadaan basah, lembab, atau kering.

g. Temperatur Tanah

Temperatur tanah sangat memengaruhi pertumbuhan dan produksi tanaman serta kehidupan biologi tanah. Dalam keadaan normal, meningkatnya temperatur tanah dapat meningkatkan perkecambahan benih tanaman, pertumbuhan dan perkembangan akar tanaman, serta pertumbuhan dan perkembangan mikroorganisme dan makroorganisme tanah. Selain itu, temperatur tanah juga memengaruhi gerakan air dan ketersediaan unsur hara di dalam tanah, yang juga berpengaruh terhadap tanaman. Oleh karena itu, temperatur tanah sering digunakan untuk menentukan jadwal penanaman dan pemanenan suatu jenis tanaman.

Temperatur tanah berpengaruh terhadap tanaman karena akar tanaman memerlukan panas untuk bertumbuh dan berkembang di dalam tanah. Secara umum tanaman akan bertumbuh dan berkembang dengan baik pada temperatur > 20 °C atau bahkan > 15 °C untuk tanaman yang kurang sensitif. Namun demikian, temperatur tanah terlalu tinggi juga akan berpengaruh buruk terhadap tanaman. Umumnya, tanaman dapat bertumbuh dan berkembang dengan baik pada

Abdul Kadir Salam – 2020

temperatur < 40 °C atau untuk tanaman yang sensitif pada temperatur < 30 °C. Dengan demikian, temperatur tanah ideal bagi tanaman terletak pada angka 20 – 30 °C. Temperatur tanah ideal akan berbeda antara berbagai jenis tanaman.

Mikroorganisme tanah memerlukan temperatur yang ideal untuk bertumbuh dan berkembang dengan baik. Sebagian ilmuwan menetapkan temperatur 30 °C optimum untuk pertumbuhan dan perkembangan mikroorganisme tanah dan karenanya temperatur 30 °C digunakan sebagai dasar untuk menentukan aktivitas maksimum mikroorganisme tanah. Penurunan temperatur di bawah 30 °C akan mengakibatkan proses-proses metabolisme di dalam tubuh mikroorganisme menurun, sedangkan peningkatan temperatur di atas 30 °C dapat bersifat degradatif sehingga dapat menurunkan populasi dan aktivitas mikroorganisme tanah.

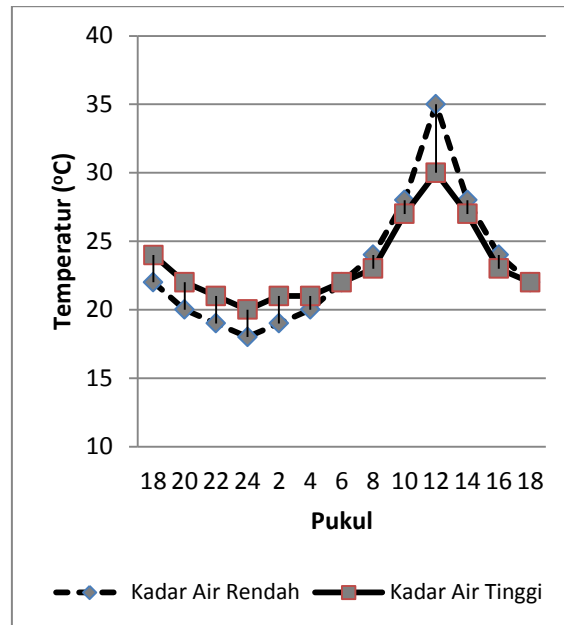
Selain berpengaruh terhadap biologi tanah dan akar tanaman, temperatur tanah juga memengaruhi beberapa proses penting di dalam sistem tanah. Gerakan unsur hara menuju akar tanaman sangat terkait dengan temperatur tanah. Vibrasi atom unsur hara akan lebih baik pada temperatur lebih tinggi, sehingga pergerakannya menuju akar tanaman akan lebih cepat. Reaksi biokimia di dalam tanah, misalnya yang melibatkan enzim tanah, akan berlangsung lebih cepat pada temperatur lebih tinggi. Demikian juga proses pelapukan mineral tanah dan dekomposisi bahan organik oleh mikroorganisme tanah akan berlangsung lebih cepat dengan meningkatnya temperatur tanah.

Temperatur tanah mengalami fluktuasi harian, tergantung pada sinar matahari. Pada tengah malam sampai pagi hari temperatur tanah berada pada titik minimum. Ketika matahari terbit dan radiasi mencapai permukaan tanah, temperatur tanah mulai meningkat dan mencapai temperatur maksimum pada tengah hari. Temperatur tanah berangsur-angsur turun dan kembali mencapai temperatur minimum pada tengah malam hari. Rataan temperatur juga berfluktuasi bulanan dan tahunan, yang sangat tergantung pada musim terkait posisi matahari.

Fluktuasi harian, bulanan, dan tahunan temperatur tanah juga sangat tergantung pada kadar air tanah. Tanah dengan kadar air tinggi (lembab) akan mengalami fluktuasi lebih rendah dibandingkan dengan tanah dengan kadar air rendah (kering). Hal ini disebabkan karena air memiliki kalor jenis yang tinggi, sehingga memiliki kemampuan untuk menahan kenaikan atau penurunan temperatur yang cepat (**Gambar 4.7**).

Sinar matahari merupakan sumber panas utama yang berpengaruh terhadap temperatur tanah. Jumlah energi matahari yang mencapai permukaan tanah dan sifat permukaan tanah akan menentukan temperatur tanah. Jumlah panas dari matahari yang diserap tergantung pada sudut jatuhnya sinar matahari di

permukaan bumi dan juga pada warna dan jenis vegetasi penutup. Panas yang menyentuh permukaan bumi diserap oleh permukaan tanah, meningkatkan temperatur tanah, dan sebagian dipantulkan kembali ke atmosfer. Bila sinar matahari jatuh tegak lurus ke permukaan bumi, serapan panas oleh tanah akan tinggi.

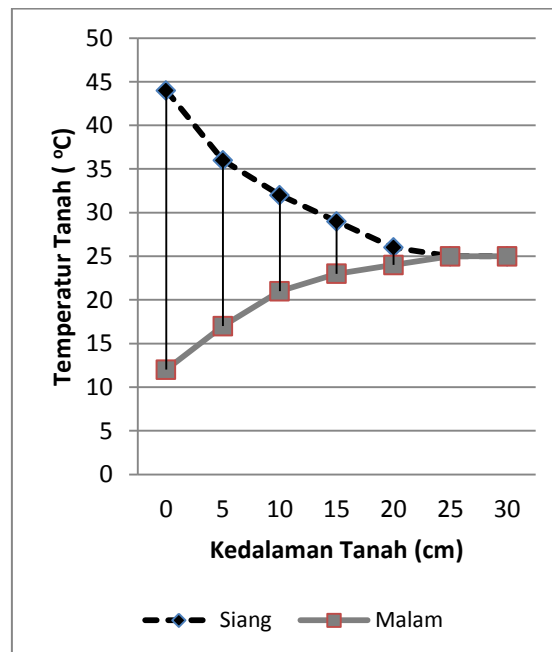


Gambar 4.7. Pengaruh kadar air tanah terhadap fluktuasi harian temperatur tanah.

Beberapa faktor penting yang memengaruhi **penyerapan panas** oleh tanah adalah: warna tanah, penutup tanah, kadar air tanah, arah dan tingkat kelerengan, dan kedalaman tanah. Tanah yang berwarna hitam menyerap 75% dari panas yang diterima dan tanah berwarna pucat hanya 25%. Kehadiran tanaman penutup mengurangi penyerapan panas oleh tanah, seperti halnya kehadiran mulsa di permukaan tanah. Kadar air tanah dapat menyangga temperatur tanah. Tanah

Abdul Kadir Salam – 2020

yang basah mengalami perubahan temperatur secara lambat karena air memiliki kalor jenis yang tinggi. Selain itu, kelereng juga menentukan kecepatan penyerapan panas. Lereng yang lurus menghadap matahari akan lebih cepat memanaskan dibandingkan dengan lereng yang membelakangi matahari. Karena panas harus merambat melalui partikel tanah, temperatur tanah berbeda berdasarkan kedalamannya (**Gambar 4.8**). Secara umum, pada siang hari temperatur lapisan atas tanah lebih tinggi daripada lapisan bawah tanah; sebaliknya, pada malam hari temperatur lapisan atas lebih rendah daripada temperatur lapisan bawah tanah. Perbedaan demikian juga ditemui pada angka rata-rata temperatur bulanan dan tahunan.



Gambar 4.8. Fluktuasi hipotetik temperatur tanah pada kedalaman tanah 0-30 cm.

Karena temperatur tanah sangat bervariasi tergantung pada posisi geografis dan iklim, maka temperatur tanah perlu dikelola dengan baik. Secara umum, **pengelolaan temperatur tanah** dapat dilakukan dengan dua cara. Yang pertama adalah dengan melakukan penyesuaian jenis tanaman dengan pola temperatur tanah alami. Yang kedua adalah dengan melakukan manipulasi temperatur tanah, baik dengan tujuan untuk meningkatkan atau pun untuk menurunkan temperatur tanah.

Cara yang paling banyak dilakukan dalam mengelola temperatur tanah adalah dengan menanam tanaman yang memiliki kebutuhan temperatur tanah yang sama dengan temperatur tanah di wilayah tertentu. Penundaan penanaman dapat dilakukan sampai temperatur tanah sesuai dengan yang dibutuhkan oleh tanaman tertentu. Cara ini lebih murah karena tidak memerlukan introduksi teknologi; tanaman dengan sendirinya akan bertumbuh dan berkembang dengan baik.

Dalam keadaan tertentu, temperatur tanah dianggap terlalu rendah untuk pertanaman tertentu, sehingga diperlukan manipulasi tertentu sehingga temperatur tanah dapat dinaikkan. Beberapa cara yang dapat dilakukan adalah dengan mengurangi penutup tanah sehingga sinar matahari dapat secara langsung menyentuh permukaan dan meningkatkan temperatur tanah. Selain itu, peningkatan temperatur tanah dapat juga dilakukan dengan menggunakan mulsa transparan, yang dengannya akan menimbulkan *micro-greenhouse effect* yang memanaskan tanah. Sinar matahari dalam bentuk gelombang pendek diserap oleh permukaan tanah, sebagiannya diradiasikan kembali dalam bentuk gelombang panjang. Gelombang panjang ini akan terkungkung di dalam mulsa transparan dan memanaskan tanah. Deguchi dkk. (2009) melaporkan bahwa penerapan kompos juga dapat menaikkan temperatur tanah.

Sebaliknya, sering juga diperlukan penurunan temperatur tanah untuk tanaman tertentu. Beberapa cara yang dapat dilakukan adalah pembuatan perindang atau penggunaan mulsa nir-transparan agar sinar matahari tidak secara langsung menyentuh permukaan tanah (Sauer dkk., 1996). Pembasahan tanah juga dapat dilakukan untuk menurunkan temperatur tanah karena air memiliki kalor jenis yang relatif tinggi sehingga dapat menghambat peningkatan temperatur tanah.

Penggunaan rumah kaca secara ekstensif juga dapat dilakukan untuk mengontrol temperatur tanah melalui pengaturan temperatur udara. Bila temperatur tanah terlalu tinggi, pendingin rumah kaca dapat diaktifkan. Sebaliknya, bila temperatur tanah terlalu rendah, sehingga tidak dapat menunjang pertumbuhan dan perkembangan tanaman, maka pemanas rumah kaca dapat

diaktifkan. Cara ini tentunya memerlukan peralatan tertentu dan relatif mahal. Cara ini banyak digunakan di wilayah dengan empat iklim.

Temperatur tanah umumnya selalu lebih tinggi daripada temperatur udara. Selain itu, temperatur tanah sangat berhubungan erat dengan temperatur udara. Oleh karena itu telah dikembangkan berbagai usaha untuk merumuskan hubungan antara temperatur tanah dengan temperatur udara. Karena temperatur tanah selalu lebih tinggi daripada temperatur udara, maka temperatur tanah biasanya dapat diprediksi dengan nilai temperatur udara ditambah dengan suatu konstanta yang dikembangkan dari nilai empirik yang diamati selama beberapa tahun. Salah satu perumusan hubungan tersebut yang dikembangkan untuk wilayah Terbanggi Besar, Lampung Tengah, adalah sebagai berikut (Wiharso, 1998):

$$T_s = T_a + 1.9 (^{\circ}\text{C}) \quad \text{..... Pers. 4.7 (Musim Kemarau)}$$

$$T_s = T_a + 2.2 (^{\circ}\text{C}) \quad \text{..... Pers. 4.8 (Musim Penghujan)}$$

dengan T_s adalah temperatur tanah dan T_a adalah temperatur udara. Persamaan di atas menunjukkan dengan jelas bahwa temperatur tanah pada Musim Penghujan lebih tinggi dibandingkan dengan Musim Kemarau.

4.3 Dinamika dan Pengelolaan Sifat Fisika Tanah

Sifat fisika tanah bersifat dinamik, berubah dari waktu ke waktu di bawah pengaruh berbagai faktor lingkungan. Faktor lingkungan mencakup faktor lingkungan internal dan faktor lingkungan eksternal tanah. Faktor internal tanah di antaranya adalah pertumbuhan dan perkembangan mikroorganisme, pertumbuhan dan perkembangan akar tanaman, emisi CO_2 , dan perubahan kadar air tanah. Faktor eksternal tanah di antaranya adalah curah hujan, intensitas sinar matahari, penambahan bahan organik, pemupukan, dan beban fisika di permukaan tanah.

a. Pemadatan Tanah

Telah diungkapkan sebelumnya bahwa pertumbuhan dan perkembangan tanaman serta kehidupan biologi tanah sangat tergantung pada pori dan porositas tanah. Porositas tanah sangat diperlukan untuk menyediakan air dan udara bagi

Abdul Kadir Salam – 2020

mikroorganisme tanah dan akar tanaman. Oleh karena itu, porositas tanah harus dipertahankan dengan baik agar pertumbuhan dan perkembangan biologi tanah dan akar tanaman dapat berlangsung dengan baik.

Namun demikian, berbagai aktivitas antropogenik dapat memberikan beban tertentu di atas tanah. Misalnya aktivitas manusia yang berjalan kian kemari dalam mengolah lahan, traktor pengolah tanah yang berjalan bolak balik di atas lahan, penggunaan peralatan-peralatan yang memiliki beban berat. Seluruh aktivitas antropogenik ini bila berlangsung terus menerus akan memadatkan tanah sehingga mengakibatkan porositas tanah menurun dan persentase pori mikro tanah meningkat. Karena porositas dan jenis pori tanah berubah, maka kesetimbangan air dan udara juga dapat terganggu sehingga berdampak pada pertumbuhan dan perkembangan biota tanah dan akar tanaman.

Pengolahan tanah dengan sistem tanpa olah tanah atau olah tanah minimum dalam jangka panjang dapat juga memadatkan tanah karena sama sekali tidak ada bagian tanah yang diolah atau walaupun diolah hanya pada titik penanaman saja. Oleh karena itu, penerapan sistem pengolahan tanah ini harus diselingi dengan olah tanah maksimum (konvensional) untuk mengembalikan porositas dan jenis pori tanah yang ideal.

Menurut Gregorich dkk. (2011), pemadatan tanah memengaruhi hampir seluruh sifat dan fungsi tanah sehingga memengaruhi pertumbuhan, distribusi, dan fungsi akar serta produksi tanaman. Pemadatan tanah terbukti menurunkan pertumbuhan dan produksi tanaman jagung; produksi tanaman menurun sampai 33% dan bobot keringnya menurun sampai 26%. Pemadatan tanah lebih besar terjadi pada tanah dengan kandungan liat yang lebih tinggi.

b. Pengolahan Tanah

Pemadatan tanah harus dihindari agar tanah memenuhi syarat untuk menjadi tempat pertumbuhan dan perkembangan biologi tanah dan akar tanaman. Salah satu cara untuk mengurangi kepadatan tanah adalah dengan pengolahan tanah. Pengolahan tanah mencakup pemindahan, pembalikan, dan pencampuran tanah. Dengan pengolahan tanah maka porositas tanah akan kembali meningkat dan jenis pori makro akan kembali bertambah sehingga tanah dapat menyediakan air dan udara dengan baik.

Selain memperbaiki porositas tanah, pengolahan tanah juga memiliki beberapa manfaat lain, yaitu:

Abdul Kadir Salam – 2020

1. Menyiapkan tanah untuk tanaman. Dengan pengolahan tanah dapat dipersiapkan guludan atau alur penempatan benih atau bibit tanaman.
2. Mengontrol pertumbuhan gulma. Pengolahan tanah dapat mematikan gulma, hama, dan penyakit. Pengolahan tanah dapat mematikan biji atau benih gulma. Pengolahan tanah juga dapat menyatukan sisa tanaman yang biasanya menyimpan hama dan penyakit dalam tanah.
3. Mencampur sisa tanaman yang tertinggal atau memperlakukannya ke dalam tanah. Dengan pengolahan tanah, bahan organik berupa sisa tanaman akan masuk dan bercampur dengan tanah sehingga dapat terdekomposisi secara cepat.
4. Menyatukan pestisida atau pupuk. Beberapa jenis pupuk atau pestisida akan lebih efektif bila dicampur dengan tanah.
5. Memperbaiki sifat fisika tanah. Penggunaan alat berat atau beban lain mengakibatkan pemadatan tanah. Pengolahan tanah akan menggemburkan tanah.
6. Mengurangi erosi tanah. Pengolahan tanah dapat memperbaiki porositas tanah sehingga dapat meningkatkan proses infiltrasi air dan menurunkan risiko erosi.

Pengolahan tanah dapat dilakukan dengan beberapa metode tergantung tingkat kepadatan tanah dan tingkat porositas tanah yang diinginkan. Pengolahan tanah yang biasa dilakukan adalah: Olah Tanah Maksimum (Konvensional), Olah Tanah Minimum (OTM), dan Tanpa Olah Tanah (TOT). Olah Tanah Minimum dan Tanpa Olah Tanah biasanya dikelompokkan ke dalam Olah Tanah Konservasi (OTK).

Olah Tanah Konvensional mengharapkan meningkatnya porositas tanah secara maksimum, sehingga pori tanah mampu menyimpan air dan udara dan akar tanaman dapat bertumbuh dan berkembang dengan sempurna. **Olah Tanah Minimum** ditujukan untuk meningkatkan keefisienan pengolahan tanah dengan hanya mengolah bagian tanah yang akan ditanami saja dalam radius yang mungkin akan digunakan akar tanaman bertumbuh dan berkembang. Untuk menekan pertumbuhan dan perkembangan gulma biasanya digunakan herbisida. Sedangkan **Tanpa Olah Tanah** digunakan bila tanah cukup subur dan tidak terlalu padat, sehingga masih memungkinkan air dan udara tersedia dengan baik untuk memenuhi kebutuhan biologi tanah dan akar tanaman. Dalam sistem ini, seluruh sisa tanaman dikembalikan ke permukaan tanah dan penanaman dilakukan dengan sedikit gangguan terhadap permukaan tanah.

Sistem Olah Tanah Minimum dan Tanpa Olah Tanah dapat mengurangi biaya pengolahan tanah. Selain itu, sistem ini juga dapat mengurangi risiko erosi tanah

dan umumnya meningkatkan agregasi partikel-partikel tanah, kecepatan infiltrasi air dan cadangan air tanah (Christensen dkk., 1994; Baumhardt dan Lascano, 1996; Kumari dkk., 2011). Olah Tanah Konservasi dapat mengurangi erosi lapisan atas tanah disebabkan oleh kehadiran mulsa dan meningkatnya kandungan bahan organik tanah. Sharpley dkk. (1991b) menunjukkan bahwa praktik olah tanah konservasi dapat menekan angkutan sedimen dan berbagai unsur hara yang dikandungnya melalui aliran permukaan. Kehilangan NO_3^- , NH_4^+ , PO_4^{3-} , dan Atrazin juga lebih rendah dari tanah dengan Sistem Olah Tanah Konservasi (Seta dkk., 1993), sehingga meningkatkan kualitas air bawah tanah (Gish dkk., 1995).

Umumnya, sistem Olah Tanah Konservasi mengharuskan sekitar 30% dari permukaan tanah tertutup oleh sisa tanaman. Kehadiran sisa-sisa tanaman ini juga dapat meningkatkan kadar bahan organik tanah (Salinas-Garcia dkk., 1997), yang dapat memperbaiki tingkat N, P, dan K serta aktivitas enzim urease dan fosfatase asam (Klein dan Koths, 1980; Salam dkk., 1998c; Fang dkk., 2010). Dampak dari meningkatnya kandungan bahan organik tanah dengan penerapan Olah Tanah Konservasi terhadap meningkatnya aktivitas enzim fosfatase disajikan pada **Tabel 4.7**.

Tabel 4.7. Peningkatan aktivitas fosfatase akibat penerapan Sistem Olah Tanah Konservasi*.

Sistem Olah Tanah	N Urea (kg ha^{-1})		
	0	100	200
 $\mu\text{g } p\text{-Nitrofenol g}^{-1} \text{ j}^{-1}$		
Olah Tanah Intensif	157	142	140
Olah Tanah Minimum	187	174	173
Tanpa Olah Tanah	169	163	181
Rataan	171	160	165

*Diadaptasi dari Salam dkk. (1998c)

Namun, sistem olah tanah konservasi menuntut perubahan pola penanaman, pemupukan, dan perlakuan herbisida. Pupuk, misalnya kadar N di dalam tanah,

harus ditingkatkan untuk merangsang dekomposisi bahan organik. Dalam sistem ini sisa tanaman dapat menjadi sarang hama. Selain itu, gulma juga dapat tumbuh dengan lebih cepat. Akibatnya, pestisida juga perlu diberikan dalam jumlah yang lebih tinggi.

c. Pengaruh Humus dan Bahan Organik

Introduksi bahan organik ke dalam sistem tanah akan meningkatkan kandungan bahan organik tanah. Introduksi ini dapat terjadi karena masuknya bahan organik secara alami ke dalam tanah melalui serasah serta sisa-sisa tanaman dan hewan atau secara antropogenik dengan dimasukkannya pupuk organik atau pengembalian bagian tanaman yang tidak dipanen. Bahan organik di dalam tanah akan mengalami dekomposisi dan menyisakan bagian yang resisten dalam bentuk **Humus**.

Selain meningkatkan kesuburan tanah, peningkatan kandungan bahan organik dan humus di dalam tanah memengaruhi berbagai sifat fisika, kimia, dan biologi tanah (Bernas, 2011). Yang paling jelas adalah warna tanah akan menjadi lebih coklat atau hitam. Karena bahan organik dan humus adalah perekat partikel-partikel tanah maka agregasi akan terjadi dengan lebih baik sehingga meningkatkan porositas tanah. Perbaikan ini akan meningkatkan kecepatan infiltrasi dan perkolasi air di dalam tanah, dan seterusnya. Secara kimia, peningkatan kandungan bahan organik dan humus tanah juga akan memperbaiki beberapa sifat penting, seperti KTK dan KB, yang sangat penting kaitannya dengan kesuburan tanah.

Namun demikian, pengaruh bahan organik dan humus tidak kekal. Bahan organik dan humus akan terus mengalami proses dekomposisi dan berpengaruh terhadap degradasi dan penurunan porositas tanah serta memudarkan warna tanah. Degradasi sifat tanah ini akan lebih dahsyat bila tidak ada lagi introduksi bahan organik baru.

d. Infiltrasi, Perkolasi, dan Pencucian

Jenis pori dan porositas total tanah telah diungkap memiliki peranan yang sangat penting bagi terjadinya proses infiltrasi dan perkolasi air yang berkaitan dengan air yang mencapai permukaan tanah. Air, khususnya air hujan, yang jatuh

Abdul Kadir Salam – 2020

di atas permukaan tanah akan mengalami beberapa proses. Pertama, air awalnya akan masuk ke dalam tanah melalui pori tanah (**Infiltrasi**). Kedua, air kemudian bergerak di dalam tubuh tanah (**Perkolasi**) menuju **Air Bawah Tanah** (*Ground water*). Ketiga, air akan tergenang di permukaan tanah, khususnya bila pori tanah cepat terisi dan gerakan air di dalam tanah atau perkolasi berjalan lambat (lebih lambat daripada kecepatan infiltrasi) dan mengakibatkan terjadinya limpasan permukaan (**Run-off**) yaitu Bergeraknya air di permukaan tanah. Keempat, air akan mengalami limpasan permukaan yang bila diperkuat oleh gaya gravitasi akan berjalan cepat dan menggerus topsoil dan mengakibatkan **Erosi**.

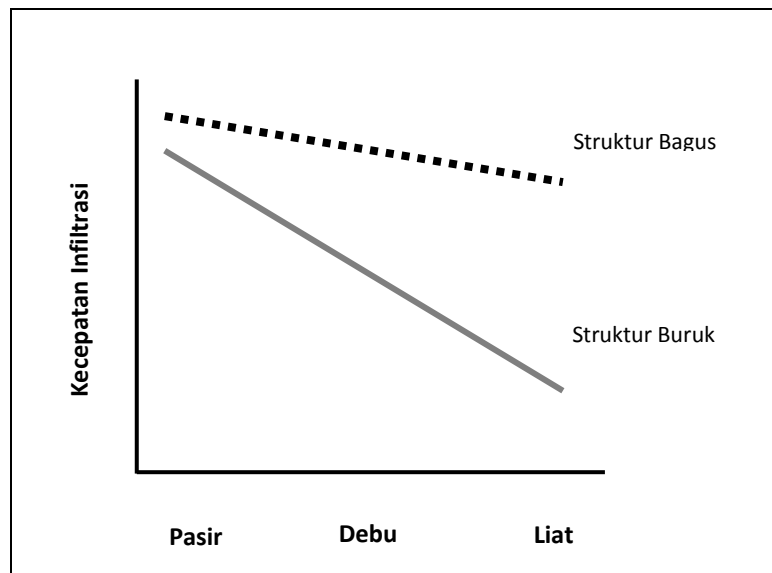
Proses masuknya air ke dalam tubuh tanah melalui pori-pori tanah yang disebut **Infiltrasi** sangat penting karena beberapa sebab. Pertama, dengan masuknya air ke dalam tubuh tanah, risiko terjadinya *run-off* dan erosi menurun. Kedua, masuknya air ke dalam tubuh tanah akan meningkatkan cadangan air di dalam tubuh tanah, yang pada gilirannya akan dimanfaatkan oleh tanaman. Oleh karena itu, porositas tanah harus dijaga agar tetap tinggi. Ini merupakan salah satu cara untuk mengawetkan air di dalam tanah.

Namun demikian, walaupun porositas tanah relatif tinggi, bila terlalu banyak pori makro maka gerakan air di dalam tubuh tanah melalui saluran pori tanah akan semakin cepat. Perkolasi akan menyebabkan terbawanya berbagai ion dan senyawa bersama air yang bergerak. Proses ini dinamakan **Pencucian**. Pencucian dapat mengakibatkan terkurasnya unsur hara penting dari topsoil sehingga menurunkan tingkat kesuburan tanah karena ketersediaan unsur hara tertentu menjadi rendah. Oleh karena itu, proses agregasi partikel-partikel tanah harus dibuat sedemikian rupa agar dapat meningkatkan porositas total dan juga keseimbangan antara pori mikro, pori meso, dan pori makro tanah. Untuk keperluan ini, teknologi biopori adalah salah satu cara yang dapat dilakukan dengan menggunakan agen biologis.

Proses pencucian juga dapat menimbulkan pencemaran air bawah tanah, yang merupakan sumber air minum. Berbagai bahan toksik seperti logam berat dan residu pestisida di dalam tanah akan berada di dalam air tanah berkesetimbangan dengan sejumlah besar logam berat dan residu pestisida yang diikat oleh koloid tanah. Bila pencucian berlangsung cepat, maka konsentrasi bahan-bahan ini di dalam air tanah akan menurun karena terbawa oleh air perkolasi atau tercuci ke lapisan tanah yang lebih bawah sehingga mencapai air bawah tanah. Penurunan konsentrasi bahan ini di dalam air tanah akan memicu terbebasnya bahan-bahan toksik yang terikat melalui reaksi kesetimbangan dan akhirnya dapat mengakibatkan penumpukan yang lebih besar bahan-bahan ini di dalam air bawah tanah.

Kecepatan infiltrasi tergantung pada beberapa faktor, khususnya sifat fisika tanah. Tanah berliat memiliki kecepatan infiltrasi lebih rendah daripada tanah berpasir karena tanah berliat memiliki lebih sedikit pori makro. Tanah berliat memiliki kecepatan infiltrasi sekitar 5 cm per 24 jam sedangkan tanah berpasir sekitar 60 cm per 24 jam atau 12 kali lipat. Hubungan kecepatan infiltrasi dengan tekstur tanah disajikan pada **Gambar 4.9**. Selain itu, kecepatan infiltrasi air juga dipengaruhi oleh faktor tanaman penutup. Dengan keberadaan tanaman penutup, permukaan tanah akan tetap stabil, agregat tanah tetap porus, sehingga air dapat masuk dan keluar tanah dengan mudah. Agregat demikian dapat terbentuk bila bahan organik terdapat dalam jumlah cukup banyak dan tanah tidak diolah secara intensif.

Pengurangan bahan organik oleh panen dapat menurunkan kecepatan infiltrasi karena pentingnya bahan organik bagi agregasi partikel tanah. Pengurangan ini bahkan dapat mengakibatkan agregat di permukaan tanah mudah hancur dan pori tanah mudah tersumbat. Selain dapat menghambat proses infiltrasi, lapisan kedap air ini dapat mengganggu pertumbuhan benih tanaman.



Gambar 4.9. Hubungan antara kecepatan infiltrasi dengan tekstur dan struktur tanah.

Di dalam tanah, air akan mengalami sedikitnya empat proses penting. Pertama, air akan bergerak melalui tubuh tanah, keluar dari daerah perakaran, dan akhirnya mencapai air bawah tanah (**Perkolasi**). Kedua, air akan kembali ke permukaan dan hilang melalui penguapan (**Evaporasi**). Ketiga, air tanah akan terikat dan/atau terserap oleh akar tanaman, sebagian menguap (**Transpirasi**). Keempat, air akan terjepit dan tersimpan di dalam tanah.

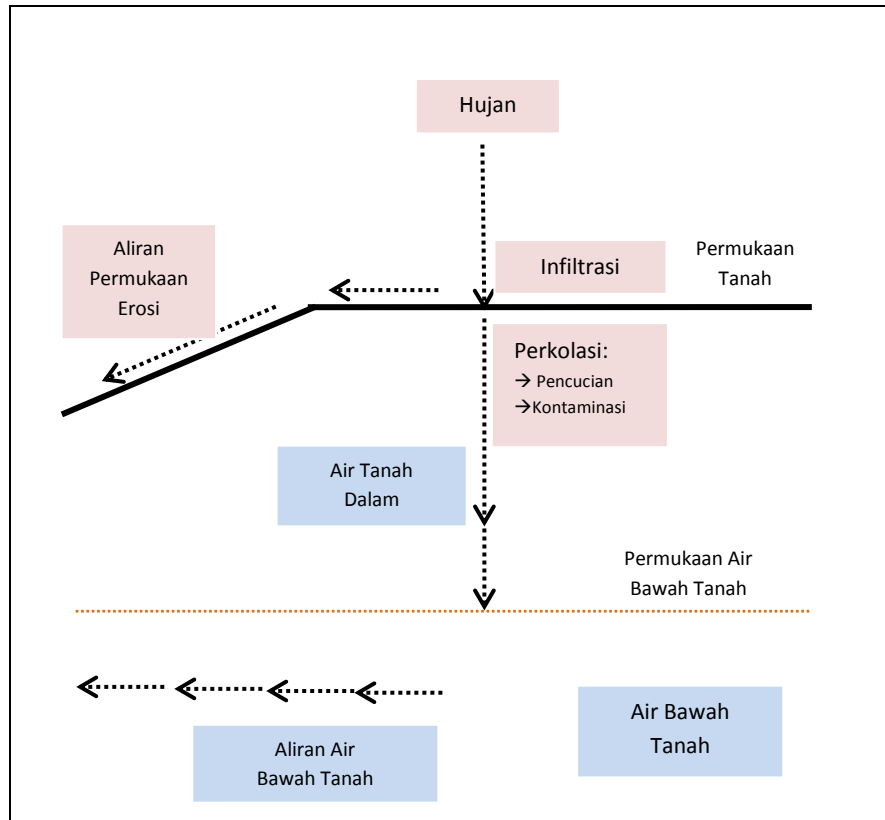
e. Simpanan, Penggunaan, dan Kehilangan Air Tanah

Air Tanah (**Soil Water**) berbeda dengan Air Bawah Tanah (**Ground Water**) (**Gambar 4.10**). **Air Tanah** adalah air yang terdapat di dalam pori mikro dan pori meso tanah, yang dalam keadaan basah (khususnya dalam keadaan jenuh) bisa juga berada di dalam pori makro tanah. Sedangkan **Air Bawah Tanah** adalah genangan air di bawah tubuh tanah. Kedua jenis air ini saling berhubungan dan saling memasok. Dalam keadaan basah, khususnya setelah hujan, sebagian air tanah dari pori makro akan bergerak ke Air Bawah Tanah karena gaya gravitasi; air ini disebut **Air Gravitasi**. Sebaliknya dalam keadaan kering, Air Bawah Tanah akan memasok Air Tanah dengan gaya kapiler, air dari Air Bawah Tanah akan merayap secara kapiler menuju topsoil melalui saluran pori. Dalam keadaan kering, air ini juga dapat mengalami evaporasi.

Tanaman menyerap air dari jenis Air Tanah. Bila air tanah diserap oleh akar tanaman, potensial air di sekitar perakaran tanaman meningkat atau kadar air tanah menurun. Pada saat demikian, air tanah dari sekitarnya yang masih lembab atau berpotensi air lebih rendah akan bergerak memasok air ke permukaan akar tanaman. Penurunan ini juga menyebabkan air dari lapisan bawah tanah (subsoil) dan bahkan dari Air Bawah Tanah bergerak menuju daerah perakaran tanaman. Seberapa banyak air yang bergerak sangat tergantung pada seberapa banyak air yang diserap oleh tanaman dan kemudian ditranspirasikan melalui daun tanaman. Penguapan air melalui permukaan tanah (**Evaporasi**) juga akan mengakibatkan meningkatnya pergerakan air secara vertikal menuju topsoil dan permukaan tanah.

Di dalam tanah, air diikat oleh gaya adhesi dan gaya kohesi. Gaya adhesi dimunculkan oleh gaya tarik permukaan partikel tanah terhadap molekul air. Gaya ini sangat kuat. Kohesi dimunculkan oleh gaya tarik menarik antara molekul air yang satu dengan molekul air yang lainnya. Kerjasama kedua gaya ini mengakibatkan terikatnya molekul-molekul air oleh partikel-partikel tanah.

Umumnya tanah dengan partikel halus (liat) mengikat lebih banyak air karena partikel kecil memiliki luas permukaan per satuan massa yang lebih tinggi dibandingkan dengan partikel kasar (pasir).

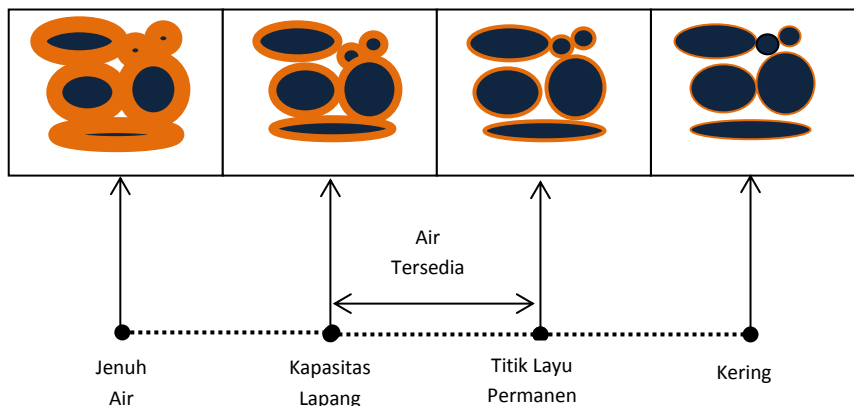


Gambar 4.10. Hubungan Air Tanah – Air Bawah Tanah, dan berbagai proses yang memengaruhinya.

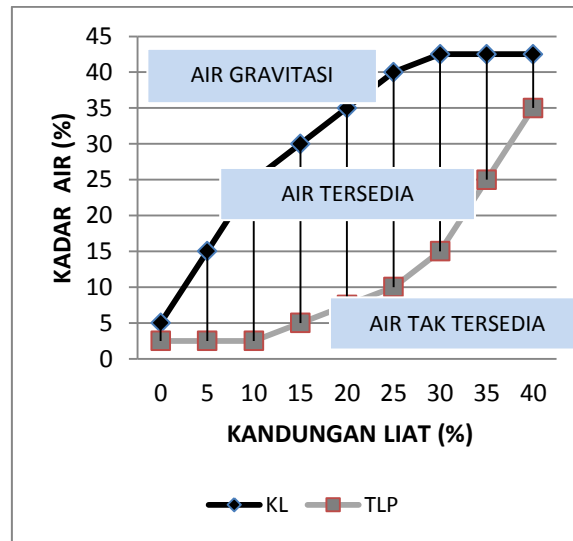
Air tanah akhirnya akan diserap oleh akar tanaman. Jumlah air yang diikat oleh tanah dan yang tersedia bagi tanaman beragam tergantung pada tekstur tanah. Setelah air gravitasi (air yang keluar dari pori tanah akibat gaya gravitasi) bergerak

keluar dari sistem tanah, air yang tertinggal di dalam pori tanah adalah yang paling tersedia bagi tanaman. Kadar air dalam keadaan seperti ini (Potensial air sekitar 10 – 35 kPa) disebut **Kapasitas Lapang (KL)** (Singer dan Munns, 1987). Namun, setelah air ini diserap oleh akar tanaman atau menguap, lapisan air di sekitar partikel tanah menipis dan semakin sulit diserap oleh akar tanaman. Pada akhirnya akan tercapai suatu kondisi saat gaya tarik partikel tanah terhadap air tanah lebih besar daripada daya serap akar tanaman. Akar tanaman akhirnya tidak mampu lagi menyerap air tersebut dan mengakibatkan tanaman kekurangan air dan mengalami kelayuan permanen. Kadar air dalam kondisi seperti ini disebut **Titik Layu Permanen (TLP)** (Singer dan Munns, 1987). Pada titik ini (Potensial air sekitar 1,520 kPa) tanaman tidak dapat menyerap air sehingga tanaman layu dan tidak dapat diperbaiki dengan penambahan air (**Gambar 4.11**).

Air yang tersedia adalah air yang berada di antara Kapasitas Lapang dan Titik Layu Permanen (**Gambar 4.11 dan 4.12**). Air tersedia berbeda untuk setiap jenis tanah tergantung pada tekstur tanah. Tanah berpasir yang memiliki partikel berukuran besar dan luas permukaan rendah dapat mengikat sedikit air. Sebaliknya, tanah liat, yang memiliki partikel berukuran halus dan luas permukaan besar dapat mengikat air lebih banyak daripada tanah pasir.



Gambar 4.11. Kadar air tanah.



Gambar 4.12. Air tersedia di dalam tanah
(KL = Kapasitas Lapang; TLP = Titik Layu Permanen;
Diadaptasi dari Harpstead dkk., 1988).

Air tanah yang terikat ini tidak bersifat statis, namun dapat bergerak ke segala arah. Air dapat bergerak ke bawah karena pengaruh gaya gravitasi dan ke segala arah karena gaya kapiler, yang merupakan kombinasi antara gaya adhesi dan gaya kohesi. Gerakan air ke bawah oleh gravitasi biasanya melalui pori-pori yang lebih besar. Namun bersamaan dengan itu, partikel tanah menarik air dari segala arah dengan gaya adhesi dan gaya kohesi. Bila gaya gravitasi lebih rendah daripada gaya adhesi dan gaya kohesi, gerakan air ke bawah akan terhenti dan air akan tertahan di dalam tanah, yang kemudian akhirnya dapat dimanfaatkan oleh tanaman atau menguap.

Akar tanaman akan menyerap air dari lapisan air di sekitar partikel tanah. Air kemudian akan bergerak dari lapisan lebih tebal ke lapisan air yang lebih tipis. Perpindahan ini disebut dengan **gerakan kapiler**. Air akan menuju permukaan akar dari segala arah. Bersamaan dengan gerakan air ini, unsur hara bergerak menuju

akar tanaman. Gerakan ini sangat lambat, sehingga akar tanaman harus selalu berkembang menuju tempat terdapatnya air.

Gerakan air gravitasi akan melambat bila mencapai wilayah tubuh tanah yang lebih kering atau mencapai permukaan air bawah tanah, yang merupakan permukaan air tempat pori tanah semuanya terisi air. Permukaan air bawah tanah ini bisa terdapat di lapisan atas atau lapisan bawah atau padas. Permukaan danau, sungai, dan lahan basah adalah permukaan air bawah tanah yang berada di permukaan bumi.

Air tanah akhirnya dimanfaatkan oleh tanaman atau hilang melalui transpirasi, evaporasi, atau drainase. Yang digunakan oleh tanaman sebagian besar akan hilang melalui **transpirasi**. **Evaporasi** menunjukkan kehilangan air dari permukaan tanah sebagai akibat tanggapan tanah terhadap energi matahari, gerakan air, dll. Dalam kondisi kering, air tanah akan bergerak ke permukaan tanah secara kapiler dan menguap bila permukaan tanah mengering. Evaporasi dan transpirasi (**Evapotranspirasi**) merupakan proses terpenting yang dapat mengurangi cadangan air tanah secara drastik.

Kehilangan air melalui evaporasi dapat dikurangi salah satunya dengan penggunaan mulsa. Mulsa yang dapat digunakan di antaranya adalah jerami, pasir, dan plastik. Bahan organik seperti jerami umumnya lebih baik karena mulsa ini dapat disatukan dengan tanah setelah panen. Mulsa pasir dan kerikil dapat lebih baik daripada jerami karena memungkinkan hujan kecil memasuki tanah dan tidak terikat oleh mulsa. Mulsa plastik hitam sangat efektif tidak hanya untuk menurunkan evaporasi tetapi juga untuk mengontrol gulma.

f. Pergerakan Unsur Hara

Sistem saluran pori yang terisi air, yang bersifat statis atau bergerak, juga mengakibatkan pergerakan unsur hara melalui berbagai mekanisme. Sebagian ilmuwan berpendapat bahwa unsur hara bergerak melalui air tanah dengan tiga mekanisme, yaitu: **Aliran Massa**, **Difusi**, dan **Intersepsi Akar**; sebagian lagi mengelompokkannya menjadi dua mekanisme, yaitu: Aliran Massa dan Difusi. Intersepsi Akar dimasukkan ke dalam mekanisme Aliran Massa atau Difusi karena pada dasarnya yang terjadi di dalam Intersepsi Akar adalah sebuah bentuk aliran massa atau difusi namun dalam jarak yang relatif pendek.

Sistem saluran pori yang berisi air yang saling berhubungan merupakan faktor penting yang menjadi syarat pergerakan unsur hara di dalam tanah. Saluran ini

adalah sebuah *highway* bagi unsur hara yang bergerak dengan mekanisme Aliran Massa atau Difusi. Semakin baik hubungan antara air di dalam pori yang satu dengan pori yang lain akan semakin baik kualitas *highway* tersebut bagi pergerakan unsur hara. Selain itu, **Kekelokan (Gambar 4.4)** juga sangat menentukan kecepatan pergerakan unsur hara, sebab semakin tinggi kekelokannya akan semakin panjang jalur yang harus ditempuh oleh unsur hara sehingga semakin lama juga waktu tempuh pergerakan unsur hara untuk mencapai titik tertentu di dalam tubuh tanah.

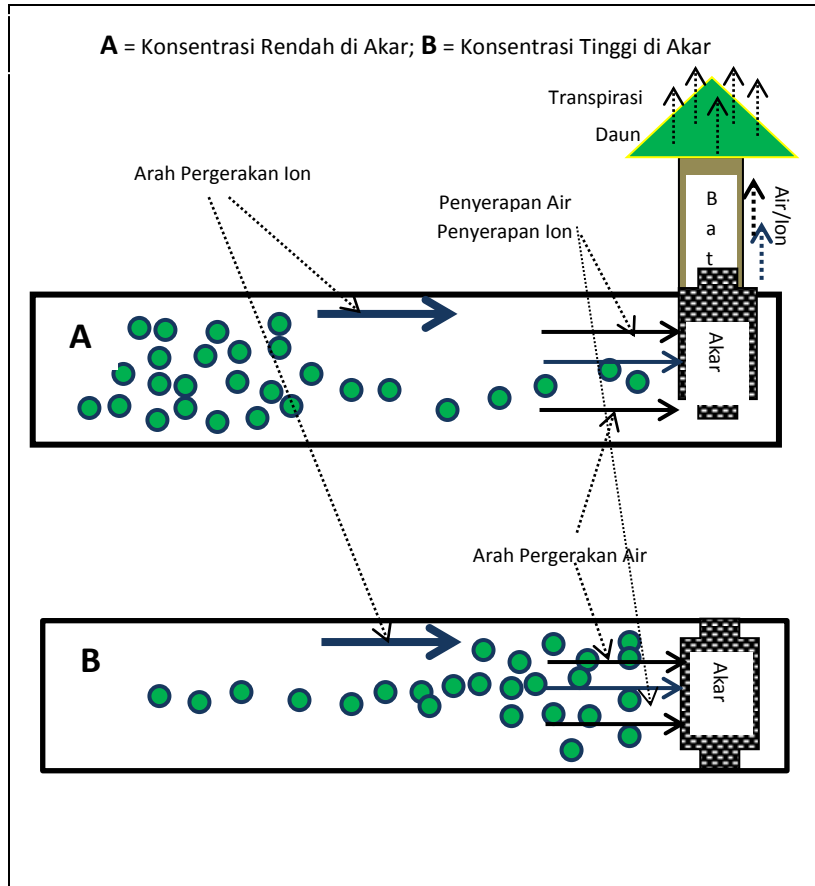
Aliran Massa adalah proses bergeraknya unsur hara bersama dengan pergerakan air, sehingga arah pergerakannya sama dengan arah pergerakan air di dalam tanah. Karena secara umum pergerakan air di dalam tanah adalah menuju permukaan akar tanaman, maka aliran massa akan menggerakkan unsur hara ke permukaan akar tanaman (**Gambar 4.13**). Sebagian unsur hara, misalnya N, bergerak menuju permukaan akar tanaman dengan mekanisme aliran massa.

Kecepatan pergerakan unsur hara dengan mekanisme Aliran Massa tergantung pada empat faktor utama, yaitu: (a) konsentrasi unsur hara di dalam air tanah, (b) kebutuhan tanaman terhadap unsur hara, (c) kecepatan serapan air oleh akar tanaman, dan (d) kecepatan transpirasi. Dapat dipahami bahwa pergerakan unsur hara akan lebih cepat bila: (a) konsentrasi unsur hara di dalam air tanah relatif tinggi, (b) kebutuhan tanaman terhadap unsur hara tersebut relatif tinggi sehingga jumlah serapannya juga tinggi, (c) kecepatan serapan air oleh akar tanaman lebih tinggi, dan (4) kecepatan transpirasi relatif tinggi, karena dapat memicu meningkatnya serapan air oleh akar tanaman.

Kecepatan pergerakan unsur melalui aliran massa juga sangat dipengaruhi oleh muatan unsur. Anion akan bergerak lebih cepat di dalam tanah dibandingkan dengan kation. Kation akan mengalami penghambatan karena muatannya positif, yang akan mengalami penghambatan oleh permukaan koloid tanah di sepanjang saluran pori tanah yang bermuatan negatif (**Gambar 4.14**).

Difusi sangat berbeda dengan Aliran Massa. Pergerakan unsur hara dengan mekanisme difusi tidak harus sama dengan arah pergerakan air (**Gambar 4.15**). Difusi lebih diatur oleh perbedaan konsentrasi antara dua buah titik lokasi unsur hara di dalam tubuh tanah. Unsur hara bergerak dari titik dengan konsentrasi tinggi ke titik dengan konsentrasi rendah. Semakin tinggi perbedaan konsentrasi antara kedua titik tersebut semakin cepat juga pergerakan unsur hara. Dengan demikian, unsur hara di dalam tanah bisa bergerak menuju permukaan akar tanaman atau menjauhinya. Bila konsentrasi unsur hara tertentu di permukaan akar tanaman rendah karena diserap oleh tanaman maka dapat dipastikan bahwa unsur hara tersebut akan bergerak menuju permukaan akar. Sebaliknya bila unsur

hara di sekitar perakaran tanaman tinggi karena terdapat sumber unsur hara tertentu maka unsur hara tersebut akan bergerak menjauhi perakaran tanaman.

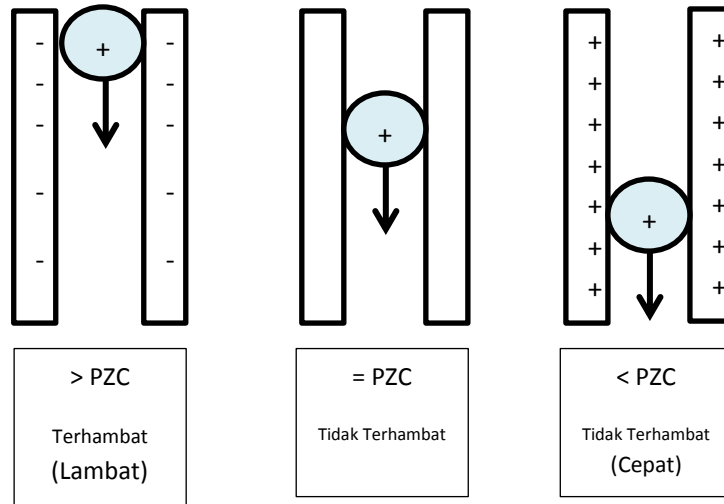


Gambar 4.13. Pergerakan unsur hara dengan cara aliran massa.

Secara umum faktor yang memengaruhi kecepatan pergerakan unsur hara dengan mekanisme difusi dapat digambarkan secara matematika sebagai berikut:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = D_e \frac{C_2 - C_1}{L} \dots\dots \text{Pers. 4.9}$$

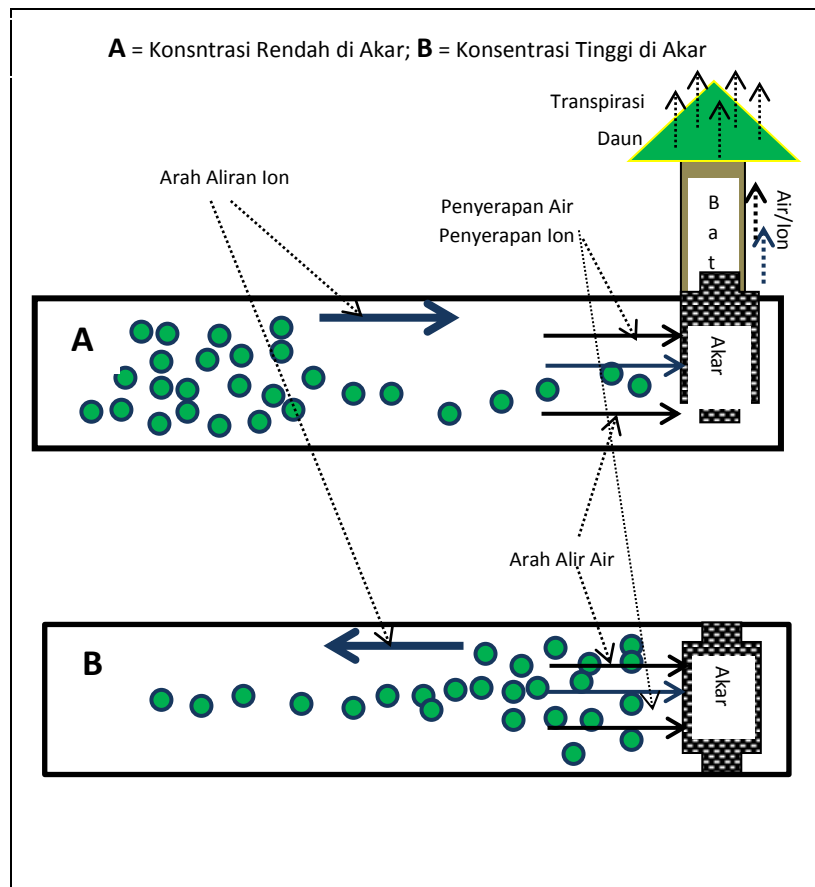
dengan $\frac{\Delta Q}{\Delta t}$ adalah kecepatan difusi ion, D_e adalah koefisien difusi ion di dalam air tanah, C_2 adalah konsentrasi ion pada jarak L dari C_1 , C_1 adalah konsentrasi ion di permukaan akar tanaman, dan L adalah jarak antara C_1 dan C_2 .



Gambar 4.14. Penghambatan pergerakan kation dalam saluran pori tanah yang bermuatan negatif (PZC Point of Zero Charge; Salam, 2017).

Dengan berdasar pada **Persamaan 4.9**, beberapa faktor yang memengaruhi gerakan unsur hara dengan mekanisme difusi adalah: (1) koefisien difusi, D , (2) konsentrasi unsur hara di lokasi tertentu di dalam tubuh tanah jauh dari akar tanaman, C_2 , (3) konsentrasi unsur hara di permukaan akar tanaman, C_1 , dan (4) kapasitas sangga tanah. Faktor D sangat ditentukan oleh jenis unsur hara. Sebagian unsur hara bersifat mobil, misalnya NO_3^- , dan sebagian lagi imobil dalam tanah, misalnya Ca^{2+} dan K^+ . Selain itu, difusi juga dipengaruhi oleh kadar air tanah dan kekelokan saluran pori tanah, yang merupakan jalan bagi pergerakan unsur hara di dalam sistem tanah.

Abdul Kadir Salam – 2020



Gambar 4.15. Pergerakan unsur hara dengan cara Difusi.

Ketergantungan kecepatan difusi unsur hara terhadap faktor-faktor di atas dapat diringkas dalam persamaan Fick berikut:

$$D_e = D_w \theta f \frac{1}{b} \dots\dots \text{(Pers. 4.10)}$$

dengan D_e adalah koefisien difusi unsur hara di dalam air tanah, D_w adalah koefisien difusi unsur hara di dalam air, θ adalah kadar air volumetrik tanah, f adalah faktor kekelokan (*tortuosity*) yang merupakan kebalikan dari panjang saluran pori tanah

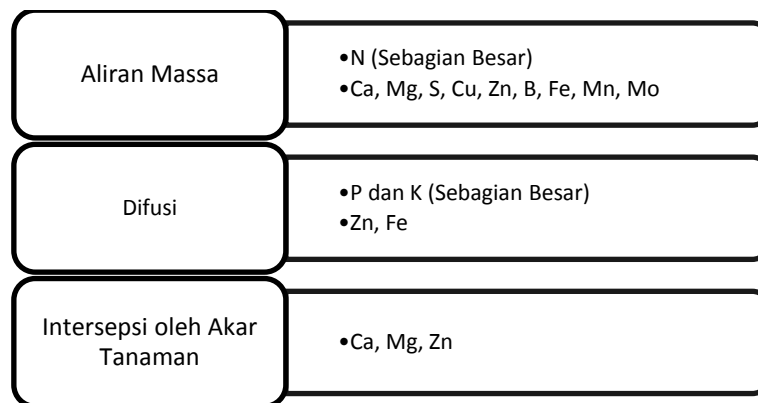
yang bersinambungan, dan b adalah kapasitas sangga tanah (Barber, 1981). Persamaan ini menggambarkan bagaimana faktor jenis unsur hara, kadar air tanah, faktor kekelokan, dan kapasitas sangga tanah memengaruhi kecepatan difusi. Umumnya, kecepatan difusi akan meningkat dengan meningkatnya kadar air tanah, faktor kekelokan, dan kapasitas sangga tanah

Intersepsi oleh akar tanaman dipersepsikan sebagai pertukaran kontak karena permukaan akar tanaman bersinggungan langsung dengan unsur hara pada permukaan padatan tanah. Namun demikian, yang terjadi sebenarnya adalah unsur hara tersebut terlebih dulu dibebaskan dari permukaan koloid tanah dan memasuki lapisan tipis air yang membatasi koloid tanah dan akar tanaman. Akar tanaman akan mengikat atau menyerap unsur hara tersebut dari selaput tipis air. Apa yang terjadi sebenarnya adalah sebuah aliran massa atau difusi dalam jarak yang sangat pendek.

Jarak jangkauan gerakan unsur hara melalui proses difusi dan aliran massa tidak terlalu jauh dan berbeda untuk setiap jenis unsur hara. Secara umum N akan bergerak dalam rentang 1 cm, P 0.02 cm, dan K 0.2 cm. Jarak jangkauan gerak unsur hara ini dengan jelas juga menunjukkan bahwa N lebih mobil daripada K, dan P adalah yang paling tidak mobil di dalam sistem tanah. Mekanisme pergerakan beberapa jenis unsur hara disajikan pada **Gambar 4.16**.

g. Sistem Drainase

Air Tanah dan Air Bawah Tanah sangat diperlukan untuk keberlangsungan hidup biologi tanah, tanaman, dan hewan. Oleh karena itu dalam jumlahnya yang logis keberadaan air tanah dan air bawah tanah sangat diperlukan. Namun demikian, ada kalanya kadar air tanah terlalu tinggi atau permukaan Air Bawah Tanah terlalu dangkal. Keberadaan air seperti ini tidak menguntungkan dan umumnya merugikan. Oleh karena itu, kelebihan air ini harus dikurangi ke tingkat yang memungkinkan tanaman untuk dapat memanfaatkannya dengan baik. Formula yang terbaik adalah dengan menyetel kadar air supaya berada sedekat mungkin dengan KL. Tergantung pada jenis tanahnya KL bisa mencapai 35 – 60%; semakin halus tekstur tanah umumnya semakin tinggi KL (**Gambar 4.12**) dan semakin baik agregasi tanahnya atau porositasnya, semakin tinggi pula KL tanah tersebut (**Gambar 4.6**).



Gambar 4.16. Mekanisme pergerakan unsur hara di dalam air tanah.

Drainase air tanah dapat dilakukan dengan meningkatkan porositas topsoil atau mungkin sampai subsoil. Kadang-kadang, tanah yang telah dikelola dalam jangka panjang mengalami pemadatan sampai ke subsoil, yang dapat mengakibatkan perkolasi air tertahan dan bahkan mengakibatkan jenuhnya tanah di topsoil. Pengolahan dalam akan meningkatkan kecepatan infiltrasi dan perkolasi air sehingga genangan air dapat dihindari.

Dalam beberapa kasus, permukaan Air Bawah Tanah dapat menjadi terlalu dangkal sehingga menyebabkan topsoil selalu lembab dan menyulitkan pertumbuhan dan perkembangan tanaman. Akibatnya, permukaan Air Bawah Tanah harus diturunkan, misalnya dengan membuat parit untuk mengalirkan Air Bawah Tanah ke tempat yang lebih rendah, sehingga permukaan Air Bawah Tanah dapat diturunkan. Untuk jenis tanah tertentu, penurunan permukaan Air Bawah Tanah harus dilakukan dengan hati-hati karena, misalnya, bahaya hadirnya mineral Pirit (FeS_2). Bila permukaan Air Bawah Tanah turun lebih rendah dari lapisan pirit, maka akan mengakibatkan teroksidasinya Pirit (**Reaksi 3.4**). Proses kimia ini akan mengakibatkan munculnya H_2SO_4 , yang sangat menurunkan pH tanah. Reaksi tanah yang terlalu rendah akan sangat mengganggu pertumbuhan dan perkembangan tanaman.

Dalam kondisi yang sangat berbeda, di wilayah tertentu, terutama dengan curah hujan yang tinggi, air tanah bisa terdapat dalam jumlah terlalu banyak sehingga dapat mengganggu pertumbuhan dan perkembangan akar tanaman karena kekurangan oksigen. Bila hal ini terjadi, usaha drainase untuk menurunkan permukaan air bawah tanah perlu dilakukan. Salah satu cara yang dapat dilakukan adalah dengan menggunakan sistem drainase pipa yang dipasang di bawah perakaran tanaman dengan jarak 0.3 m satu sama lain sedalam 0.6 – 1.8 meter dengan posisi miring ke arah sungai atau reservoir tempat air tersebut dikeluarkan (Singer dan Munns, 1987). Air di dalam pori makro dapat merembes menuju pipa melalui lubang yang dibuat pada pipa tersebut dan mengalir di dalamnya sampai ke reservoir. Dengan cara ini daerah perakaran tanaman akhirnya dapat memiliki kadar air lebih cocok untuk pertumbuhan dan perkembangan tanaman.

Namun, air tergenang juga dapat menimbulkan masalah tersendiri (Moore dan Patrick, 1989a; 1989b). Tergenangnya tanah oleh air akan mengakibatkan pergeseran-pergeseran kimia tanah, khususnya terkait dengan reaksi redoks (Garrels dan Christ, 1965; Lindsay, 1979). Contoh yang paling jelas adalah seperti yang terjadi pada tanah sawah, yang secara periodik mengalami pengeringan dan penggenangan. Pada saat dikeringkan, tanah sawah bersifat oksidatif. Konsentrasi Fe^{2+} dan Mn^{2+} menurun, senyawa-senyawa organik yang mengandung N, S, dan C teroksidasi. Akibatnya kelarutan P menurun karena bersenyawa dengan Fe^{3+} dan Mn^{4+} membentuk Fe-P dan Mn-P.

Sebaliknya, pada saat tanah sawah digenangi, kondisi berubah menjadi reduktif, potensial Redoks (E) turun, Fe^{3+} dan Mn^{4+} direduksi, demikian juga senyawa-senyawa N dan S berada dalam bentuk tereduksi. Akibatnya, Fe-P dan Mn-P melarut, sehingga ketersediaan P meningkat. Sedangkan Fe^{2+} akan bersenyawa dengan unsur S membentuk FeS. Perbedaan kimia tanah yang terjadi pada saat pengeringan dan penggenangan tanah sawah disarikan pada **Tabel 4.8**. Proses oksidasi reduksi (redoks) akibat penggenangan dan pengeringan dapat dilihat dengan mudah dengan Diagram E – pH berkaitan dengan penurunan dan peningkatan potensial redoks (E) (**Gambar 4.17**).

Gambar 4.17 menunjukkan bahwa penggenangan mengakibatkan terhambatnya O_2 memasuki sistem tanah sehingga menyebabkan turunnya E, yang mengakibatkan terjadinya reduksi beberapa unsur seperti Fe dari Fe^{3+} menjadi Fe^{2+} . Pada pH tinggi Fe^{2+} mengendap menjadi $\text{Fe}(\text{OH})_2(\text{s})$. Bila S^{2-} hadir, Fe^{2+} juga dapat mengendap sebagai $\text{FeS}(\text{s})$. Sebaliknya, pengeringan mengakibatkan O_2 bebas memasuki tanah melalui pori-pori tanah sehingga tanah menjadi bersifat oksidatif. Akibatnya, Fe^{2+} teroksidasi menjadi Fe^{3+} , yang pada pH tinggi Fe^{3+} dan $\text{Fe}(\text{OH})_2$

berubah menjadi $\text{Fe}(\text{OH})_3(\text{s})$. Dalam kehadiran ortofosfat, Fe^{3+} juga dapat mengendap menjadi senyawa Fe-P [~].

Tabel 4.8. Kimia tanah pada saat pengeringan dan penggenangan sawah*.

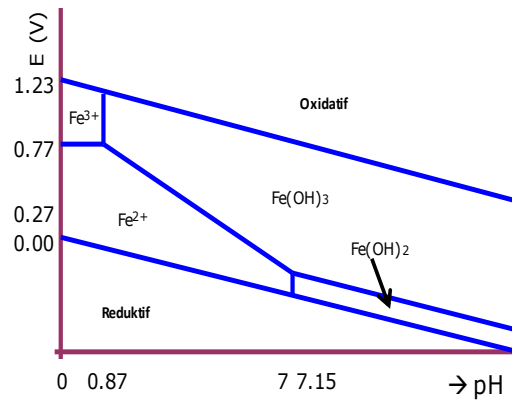
KONDISI	PERUBAHAN KIMIA	AKIBAT
Pengeringan	<ul style="list-style-type: none"> • Potensial Redoks (E) Naik • Oksidatif • $[\text{Fe}^{2+}]$ Turun • $[\text{Mn}^{2+}]$ Turun • 	<ul style="list-style-type: none"> • Al-P Mengendap • Fe-P Mengendap • Mn-P Mengendap • Fe, Mn, P Kurang Larut
Penggenangan	<ul style="list-style-type: none"> • E Turun • Reduktif • $[\text{Fe}^{2+}]$ Naik • $[\text{Mn}^{2+}]$ Naik • $\text{SO}_4^{2-} \rightarrow \text{S}$ 	<ul style="list-style-type: none"> • Al-P Melarut • Fe-P Melarut • Mn-P Melarut • P Lebih Larut • FeS Mengendap

*Diadaptasi dari Bohn dkk. (1985)

Daftar Pertanyaan Utama

1. Uraikan tiga buah fraksi padatan tanah! Jelaskan keberadaan ketiga fraksi tanah ini dalam suspensi air pada saat terjadi erosi dan limpasan air! Apakah fraksi-fraksi ini dapat bergerak menembus pori-pori tanah?
2. Apa dan bagaimana hubungan antara Tekstur Tanah, Struktur Tanah, dan Porositas Tanah?
3. Bagaimanakah cara menetapkan Kelas Tekstur Tanah di lapang dan di laboratorium? Bagaimana cara menggunakan Segitiga Tekstur untuk menetapkan Kelas Tekstur Tanah?
4. Apakah Tekstur Tanah dapat berubah? Jelaskan!
5. Bagaimanakah hubungan antara Pori Tanah dan Saluran Pori Tanah dengan Infiltrasi Air?

6. Bagaimanakah hubungan antara Pori Tanah dan Saluran Pori Tanah dengan Perkolasi Air?
7. Bedakan antara Kerapatan Isi dan Kerapatan Partikel Tanah! Bagaimana hubungan kedua sifat fisika tanah ini dengan Porositas Tanah?
8. Bagaimanakah cara menghitung Porositas Total Tanah? Jelaskan!
9. Hitung hubungan antara Kerapatan Partikel tanah dan Kerapatan Isi tanah bila Porositas Total Tanah 25% atau 50%!



Gambar 4.17. Perubahan spesies Fe akibat penurunan dan peningkatan E terkait dengan penggenangan dan pengeringan tanah (Salam, 2017).

10. Bagaimanakah hubungan Kadar Air Tanah dengan Tekstur dan Struktur Tanah? Gambarkan dengan grafik!
11. Mengapa tanah berwarna warni? Bagaimanakah cara menetapkan Warna Tanah dengan akurat?
12. Apa yang menyebabkan tanah berwarna hitam, merah, kuning, atau abu-abu?
13. Bagaimanakah fluktuasi harian temperatur tanah? Bagaimana peranan sinar matahari dalam memengaruhi temperatur tanah? Faktor apa saja yang dapat memengaruhi temperatur tanah? Bagaimana peranan air tanah dalam mengatur temperatur tanah?
14. Bagaimanakah hubungan antara temperatur tanah dengan temperatur udara?

Abdul Kadir Salam – 2020

15. Apa perbedaan Olah Tanah Sempurna dengan Olah Tanah Konservasi? Bagaimanakah kaitannya dengan kandungan bahan organik tanah?
16. Bagaimana hubungan pemadatan tanah dengan pengolahan tanah?
17. Uraikan beberapa kebaikan dan keburukan Olah Tanah Sempurna atau Olah Tanah Konvensional?
18. Uraikan beberapa kebaikan dan keburukan Olah Tanah Konservasi?
19. Bagaimana pengaruh kandungan bahan organik terhadap sifat-sifat tanah?
20. Apa yang terjadi dengan air hujan ketika dan setelah mencapai permukaan tanah? Jelaskan!
21. Bedakan antara Infiltrasi dan Perkolasi Air? Apakah keuntungan dan kerugiannya?
22. Apakah yang disebut dengan Air Tersedia, Kapasitas Lapang, dan Titik Layu Permanen? Bagaimana hubungannya dengan Tekstur Tanah?
23. Apakah yang disebut Transpirasi dan Evapotranspirasi? Bagaimana hubungannya dengan pergerakan unsur hara?
24. Apakah yang disebut dengan mulsa? Apa manfaat dan bagaimana cara kerjanya?
25. Bagaimana unsur hara di dalam tanah dapat bergerak menuju permukaan akar tanaman?
26. Apakah yang disebut Aliran Massa? Faktor-faktor apa saja yang memengaruhi kecepatan aliran massa?
27. Apakah yang disebut Difusi? Faktor-faktor apa saja yang memengaruhi kecepatan difusi?
28. Jelaskan Hukum Fick dalam kaitannya dengan pergerakan unsur hara menuju permukaan akar tanaman!
29. Apakah yang disebut dengan Intersepsi oleh Akar Tanaman?
30. Apakah yang disebut dengan Drainase Tanah?
31. Bagaimana perubahan kimia tanah yang terjadi akibat penggenangan dan pengeringan tanah sawah.

“dan di antara tanda-tanda-Nya (ialah) bahwa kau lihat BUMI KERING dan GERSANG, maka apabila Kami turunkan AIR di atasnya, niscaya ia BERGERAK dan SUBUR. Sesungguhnya Tuhan yang menghidupkannya, pastilah dapat menghidupkan yang MATI. Sesungguhnya Dia Maha Kuasa atas segala sesuatu” (QS Fushshilat [41]:39)

Bab V: KIMIA TANAH

- 5.1 Kimia Tanah
- 5.2 Liat dan Humus Tanah
- 5.3 Reaksi Tanah
- 5.4 Peranan dan Asal Usul Muatan Negatif Tanah
- 5.5 Pertukaran Kation
- 5.6 Daya Jerap Tanah dan Kapasitas Tukar Kation
- 5.7 Kejenuhan Basa dan Kejenuhan Aluminium
- 5.8 Hubungan antara Kapasitas Tukar Kation, Kejenuhan Basa, Kejenuhan Aluminium, dan Reaksi Tanah
- 5.9 Pertukaran Anion

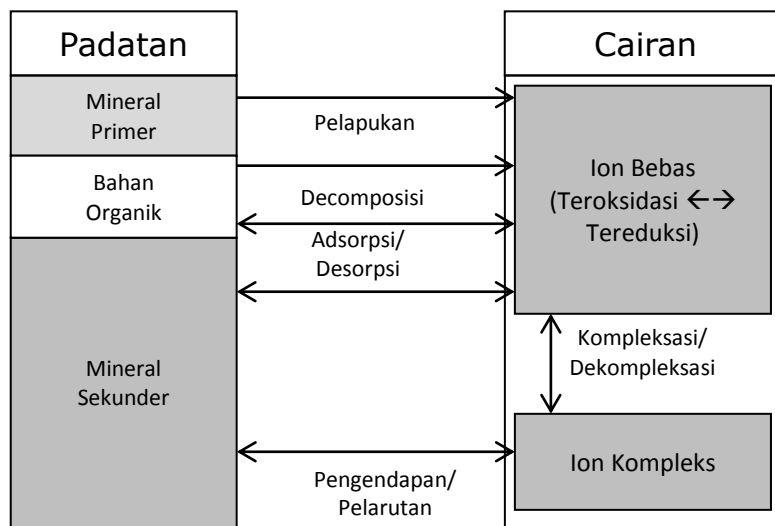
5.1 Kimia Tanah

Tanah adalah media yang sangat kompleks tempat terjadinya berbagai reaksi kimia. Secara fisika, tanah sebenarnya hanya merupakan sekumpulan partikel-partikel mineral dan nir-mineral (organik) dengan berbagai ukuran yang tersusun sedemikian rupa sehingga memiliki pori-pori tanah yang diisi oleh air

Abdul Kadir Salam – 2020

dan udara yang saling berbatasan dengan padatan tanah. Namun demikian, komponen-komponen yang menyusun tanah ini memiliki sifat-sifat kimia atau mengandung senyawa dan ion (kation, anion, ion kompleks, kelat, enzim tanah) yang secara kimia dapat berpartisipasi dalam berbagai reaksi kimia. Reaksi kimia yang terjadi dapat bersifat sederhana seperti proses penyerapan dan pertukaran kation yang melibatkan ikatan elektrostatik sederhana sampai dengan reaksi oksidasi dan reduksi (redoks) yang melibatkan banyak faktor termasuk perubahan pH dan potensial redoks (E).

Reaksi kimia dapat terjadi di dalam padatan tanah, di dalam air tanah, maupun di dalam udara tanah. Reaksi kimia juga dapat terjadi di perbatasan antar-fase seperti antar-fase padatan dan cairan, antar-fase cairan dan udara, maupun antar-fase padatan dan udara tanah (**Gambar 5.1**). Di antara reaksi-reaksi tersebut adalah kompleksasi dan dekompleksasi, adsorpsi dan desorpsi pada permukaan koloid organik maupun koloid mineral sekunder, pengendapan dan pelarutan mineral sekunder, dekomposisi bahan organik, dan pelapukan mineral primer (Ellis dan Knezek, 1982).



Gambar 5.1. Interaksi antara padatan dan cairan tanah.

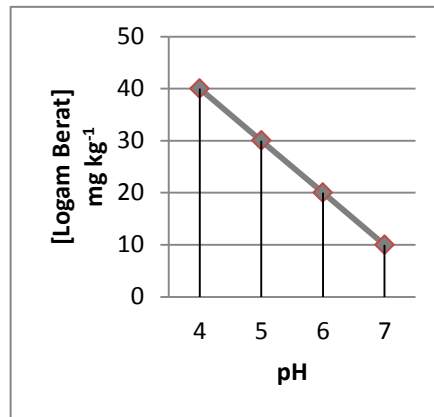
Reaksi-reaksi kimia di atas dapat dipengaruhi oleh berbagai faktor penting, di antaranya faktor utama berupa pH dan potensial redoks (E), dan faktor lingkungan seperti kadar air, temperatur tanah, dan keberadaan mikroorganisme tanah. Reaksi kimia tanah juga dipengaruhi oleh sifat dan karakter dari padatan, cairan, dan udara tanah. Karena padatan, cairan, dan udara tanah memiliki sifat dan karakter yang berbeda-beda dan faktor lingkungan yang memengaruhinya juga berbeda tergantung pada faktor waktu, maka akan terjadi berbagai reaksi kimia dengan berbagai derajat kecepatan dan jenis produknya.

Reaksi-reaksi kimia yang terjadi di dalam tanah sangat berkaitan dengan perilaku ion-ion dan senyawa-senyawa yang terlarut di dalam air tanah semisal unsur toksik atau unsur hara yang diperlukan oleh tanaman. Sebagian reaksi kimia akan bermanfaat dalam pengelolaan unsur hara tanaman, sehingga dapat digunakan untuk mempercepat dan mengurangi kelarutan dan ketersediaan suatu unsur hara. Oleh karena itu, reaksi-reaksi kimia di dalam tanah juga dapat digunakan untuk mengelola unsur atau bahan toksik yang tidak diinginkan oleh makhluk hidup, sehingga kelarutan dan ketersediaannya dapat diturunkan dengan baik. Sebagai misal, kelarutan logam berat di dalam tanah dapat diturunkan dengan meningkatkan pH tanah (**Gambar 5.2**). Penurunan kelarutan logam berat ini terkait dengan meningkatnya muatan negatif koloid tanah dengan pengapuran, sehingga kation-kation logam berat yang larut di dalam tanah kemudian terikat oleh muatan-muatan negatif koloid tanah (Salam dan Helmke, 1998; Salam dkk., 1999c). Akibatnya, kelarutan logam berat di dalam tanah yang dikapur menurun tajam.

5.2 Nanopartikel Liat dan Humus Tanah

Tanah tersusun di antaranya oleh padatan tanah. Secara umum padatan tanah mencakup sekitar 50% dari volume tanah. Sekitar 90% dari padatan tanah mineral atau 45% dari volume tanah adalah padatan mineral, sedangkan sisanya terdiri dari padatan nir-mineral (organik). Komposisi ini dapat saja berubah atau berbeda antartanah, tergantung pada jenis tanah dan waktu, karena kedua jenis bahan padatan ini akan selalu mengalami perubahan sebagai akibat dari terjadinya proses pelapukan padatan mineral dan dekomposisi padatan organik yang berlangsung secara temerus di dalam tanah. Umumnya, dekomposisi bahan organik berjalan lebih cepat daripada pelapukan bahan mineral. Oleh karena itu, komposisi padatan mineral dapat saja menjadi lebih tinggi daripada 45% dan padatan organik lebih

rendah daripada 5%. Menurut berbagai sumber, kandungan bahan organik tanah mineral berkisar antara 1-5% (Hillel, 1980; Singer dan Munns, 1987).



Gambar 5.2. Penurunan kelarutan logam dengan meningkatnya pH akibat pengapuran.

Padatan mineral terdiri atas partikel-partikel dengan berbagai ukuran, yaitu pasir yang berukuran 0.05–2 mm, debu yang berukuran 0.002–0.05 mm, dan liat yang berukuran ≤ 0.002 mm; sedangkan padatan organik berupa humus berukuran $\cong 20$ μm . Karena ukurannya yang sangat halus dan luas permukaannya yang sangat tinggi, liat dan humus memiliki peranan yang sangat besar di dalam tanah karena merupakan sumber reaktivitas tanah. Peranan ini dapat digambarkan dengan fakta bahwa setiap gram liat dengan ukuran diameter 2 μm memiliki lebih dari 9 milyar partikel liat dan luas permukaan sekitar 8 juta cm^2 . Angka ini jauh lebih besar dibandingkan dengan butiran pasir halus dengan diameter 0.020–0.20 mm yang dalam setiap gramnya hanya memiliki sekitar 46 ribu partikel dengan luas permukaan hanya 92 cm^2 .

Selain karena ukurannya yang halus, reaktivitas ini diakibatkan pula oleh muatan negatif yang muncul dari kedua bahan koloid tanah ini. Kehadiran muatan negatif yang berasal dari bahan koloid ini menyebabkan tanah dapat mengikat ion-ion yang bermuatan positif atau senyawa-senyawa yang berkutub positif.

Abdul Kadir Salam – 2020

Misalnya, unsur K dalam pupuk KCl yang diperlakukan ke dalam tanah setelah terurai menjadi ion K^+ dan Cl^- akan terikat pada koloid tanah sehingga tidak mudah terbawa oleh air perkolasi; sedangkan ion Cl^- , karena bermuatan negatif, tidak akan diikat oleh koloid negatif tanah sehingga mudah terbawa oleh air perkolasi.

Koloid tanah terdiri dari dua jenis. Yang pertama adalah **Koloid Liat**, yang terdiri dari Mineral Liat Silikat dan Mineral Liat Nir-Silikat. **Mineral Liat Silikat** merupakan mineral sekunder yang berkembang dari mineral primer dan dalam komposisinya mengandung silikat; sedangkan **Mineral Liat Nir-Silikat** merupakan mineral sekunder yang dalam komposisinya tidak mengandung silikat.

Mineral Liat Silikat berasal dari mineral silikat primer seperti Feldspars yang merupakan aluminosilikat karena tersusun oleh Al, Si, dan O. Setelah terlapuk, Feldspars menghasilkan mineral liat silikat, yang mempunyai susunan berbeda namun tetap termasuk dalam kelompok aluminosilikat. Dalam strukturnya, mineral liat silikat memiliki beberapa molekul air sehingga disebut mineral liat silikat terhidrasi. Selain itu, mineral liat silikat juga memiliki struktur berlapis.

Mineral Liat Silikat terdiri atas beberapa kelompok, di antaranya adalah Mineral Liat Tipe 1:1 dengan contoh umum Kaolinit dan Mineral Liat Tipe 2:1 dengan contoh umum Montmorilonit. Beberapa jenis Mineral Liat Silikat disajikan pada **Tabel 5.1**. Mineral Liat Nir-Silikat terdiri dari oksida, hidroksida, dan hidroksioksida atau semuanya disebut Sesquioksida atau Oksida Hidrat dari Fe, Al, dan Mn.

Tabel 5.1. Beberapa jenis mineral liat silikat*.

Mineral	Tipe	Rumus Kimia
Kaolinit	1:1	$Al_4Si_4O_{10}(OH)_8$
Haloisit	1:1	$Al_4Si_4O_{10}(OH)_8 \cdot 4H_2O$
Smektit:		
Montmorilonit	2:1	$(Al_3Mg)Si_8O_{20}(OH)_4$
Nontronit	2:1	$Fe_4(Si_7Al)O_{20}(OH)_4$
Saponit	2:1	$Mg_6(Si_7Al)O_{20}(OH)_4$
Vermikulit	2:1	$Mg(Al,Fe,Mg_4)(Al_2Si_6)O_{20}(OH)_4 \cdot nH_2O$
Illit	2:1	$Al_4Si_7AlO_{20}(OH)_4K_{0.8}$
Klorit	2:2	$Mg_6(OH)_{12}(Al,Mg_5)(Al_2Si_6)O_{20}(OH)_4$

*Diadaptasi dari Singer dan Munns (1987)

Yang kedua adalah **Koloid Organik**, yang berkembang dari bahan organik yang membusuk dan meninggalkan senyawa-senyawa yang lebih resisten berupa humus. Koloid organik memiliki reaktivitas lebih besar dibandingkan Koloid Liat. Misalnya, KTK Montmorilonit adalah 70-95 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, sedangkan KTK humus adalah 200 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$. Penambahan bahan organik adalah salah satu cara yang baik untuk meningkatkan KTK tanah agar tanah memiliki daya jerap yang tinggi terhadap air dan kation.

a. Kaolinit

Kaolinit merupakan mineral liat silikat yang paling sederhana yang banyak terdapat di tanah tua yang telah berkembang lanjut. Kaolinit banyak terdapat di tanah-tanah tropika. Mineral ini berkembang dari mineral primer yang melapuk cukup intensif di bawah temperatur tinggi dan curah hujan yang cukup tinggi.

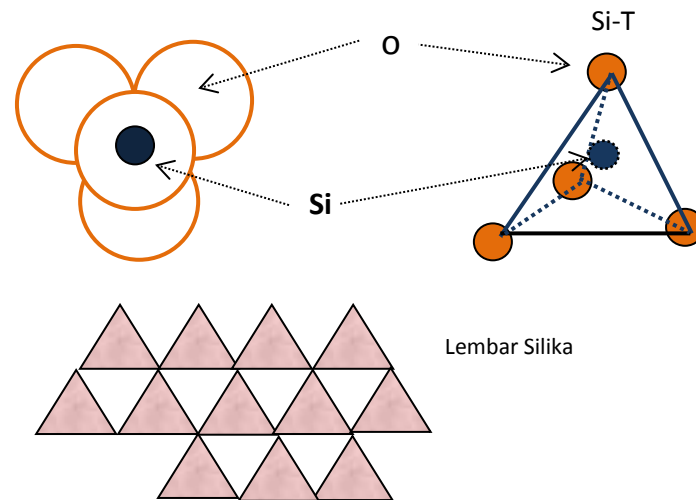
Seperti mineral liat silikat lainnya, Kaolinit dengan rumus kimia $\text{Al}_4\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$, memiliki struktur berlapis. Karena merupakan Mineral Liat Tipe 1:1, setiap lapisan mineral ini tersusun oleh sebuah **Lembaran Silika** dan sebuah **Lembaran Alumina**, sehingga memiliki perbandingan Si/Al 1/1. Lembaran Silika dan Lembaran Alumina tersusun oleh dua buah bangunan dasar liat, yaitu **Si-Tetrahedral** dan **Al-Oktahedral**, yang saling berikatan satu dengan yang lainnya membentuk lembaran (**Gambar 5.3** dan **Gambar 5.4**). Antara lapisan mineral liat silikat Tipe 1:1 diikat oleh **Ikatan Hidrogen** yang sangat kuat (**Gambar 5.5**) sehingga **Ruang Antara Lapisan** tidak dapat dimasuki oleh ion atau pun air sehingga strukturnya tidak mengembang. Ikatan ini muncul antara H dari Lembar Alumina lapisan pertama dan O dari Lembar Silika pada lapisan kedua yang berbatasan. Muatan negatif yang berkembang juga terbatas hanya dari pinggiran patahan mineral (**Gambar 3.7**). Karena keterbatasan ini, Kaolinit memiliki muatan negatif yang sangat terbatas.

b. Montmorilonit

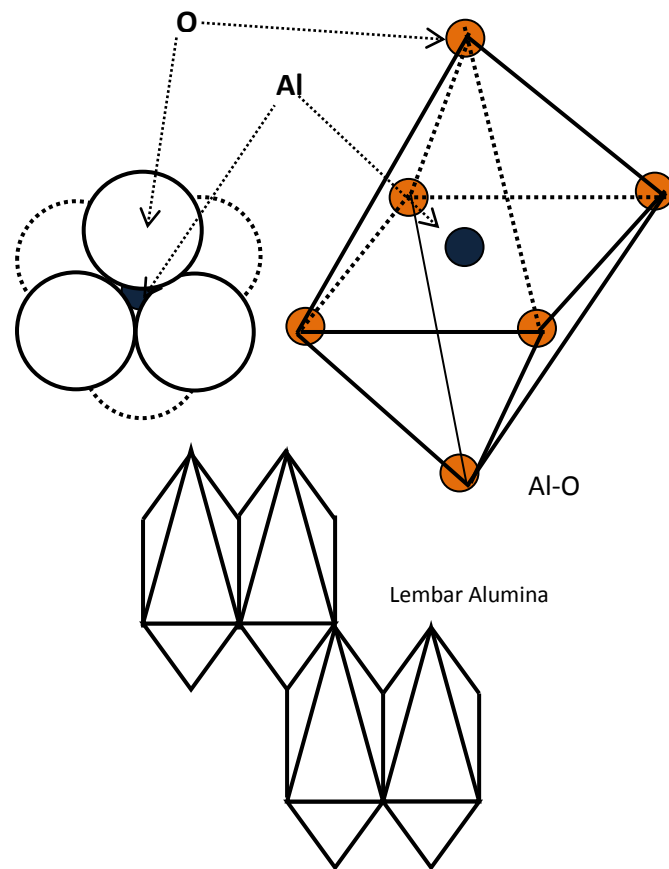
Montmorilonit merupakan mineral liat silikat yang lebih muda dibandingkan dengan Kaolinit. Mineral liat ini tergolong dalam Kelompok **Mineral Liat Smektit**

atau Mineral Liat Tipe 2:1. Dalam strukturnya, mineral ini berlapis-lapis dan setiap lapisan terdiri dari satu Lembar Alumina diapit oleh dua Lembar Silika, sehingga memiliki nisbah Si/Al 2:1 (**Gambar 5.6**). Ruang Antar Lapisan (RAL) mineral Montmorilonit tidak diikat oleh ikatan hidrogen, sehingga RAL-nya dapat mengembang dan menyempit karena ion-ion dan air dapat dengan bebas masuk ke dan keluar dari dalamnya.

Muatan negatif juga muncul tidak terbatas hanya pada patahan mineral seperti pada Kaolinit, tetapi juga pada bagian dalam RAL. Selain itu, Substitusi Isomorfik di dalam Si-Tetrahedral dan/atau Al-Oktahedral dalam Montmorilonit lebih mendominasi pembentukan muatan negatif, sehingga menghasilkan muatan negatif yang lebih tinggi dibandingkan dengan pada Kaolinit.



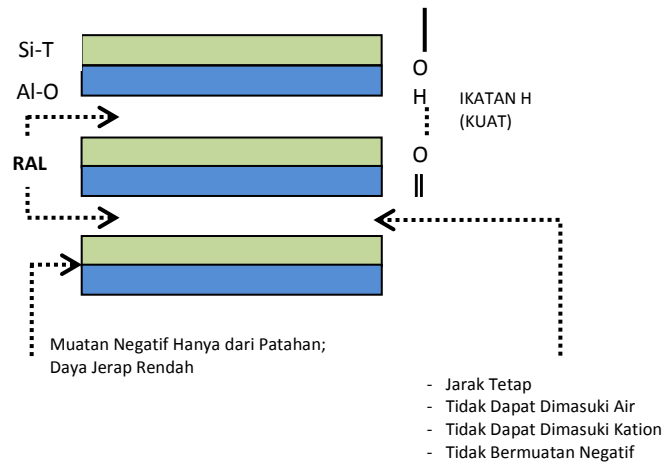
Gambar 5.3. Bangunan dasar mineral liat berupa Si-Tetrahedral dan penyusunannya dalam Lembar Silika.



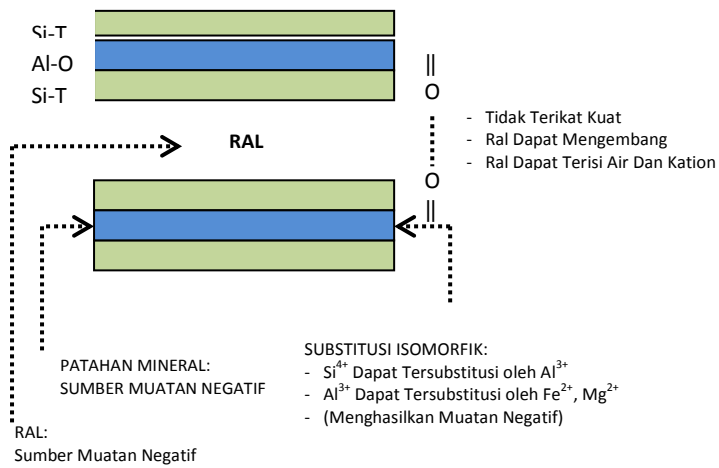
Gambar 5.4. Bangunan dasar mineral liat berupa Al-Oktahedral dan penyusunannya dalam Lembar Alumina.

Substitusi Isomorfik terjadi karena penggantian unsur seperti pada **Tabel 5.2**. Pergantian ini mengakibatkan tersisanya muatan negatif yang tidak berikatan dengan kation (**Gambar 3.8**). Misalnya, unsur Al^{3+} di dalam Al-Oktahedral yang disubstitusi oleh ion Mg^{2+} . Substitusi ini mengakibatkan munculnya sebuah muatan negatif. Berbeda dengan muatan yang berkembang pada patahan mineral liat Tipe 1:1, muatan yang diakibatkan oleh substitusi isomorfik bersifat permanen.

Perubahan pH tidak meningkatkan atau menurunkan jumlah muatan negatif pada Monmorilonit.



Gambar 5.5. Sebuah kristal mineral Liat Tipe 1:1 terdiri dari satu Lembar Silika dan satu Lembar Alumina.



Gambar 5.6. Sebuah kristal mineral liat tipe 2:1 terdiri dari dua Lembar Silika dan satu Lembar Alumina.

Tabel 5.2. Pergantian unsur dalam substitusi isomorfik.

Ion yang Diganti	Ion Pengganti	Lapisan	Muatan yang Dihasilkan
Al ³⁺	Mg ²⁺	Alumina	-1
Al ³⁺	Fe ²⁺	Alumina	-1
Si ⁴⁺	Al ³⁺	Silika	-1
Mg ²⁺	Al ³⁺	Alumina	+1

Tanah yang memiliki banyak Montmorilonit sering menjumpai masalah. Kemampuan jerap terhadap air menyebabkan lapisan silika mudah bergeser satu dengan yang lainnya, sehingga mineral liat silikat ini tidak mempunyai kekuatan untuk menahan tekanan. Sebaliknya, bila kering, mineral ini dapat menghasilkan rekahan sampai dengan 5 cm atau lebih. Tanah dengan Mineral Liat Tipe 2:1 sangat lengket dan sulit diolah pada saat basah dan keras pada saat kering. Liat tipe ini terbentuk di wilayah dengan iklim yang memungkinkan tumbuhnya padang rumput. Di daerah basah, mineral ini terbentuk dari batuan lempeng (*shale*) atau batuan basa.

c. Mika Hidrat

Salah satu contoh mineral liat silikat ini adalah **Illit**, yang mempunyai susunan yang sama dengan Mineral Liat Tipe 2:1 seperti Montmorilonit. Namun demikian, berbeda dengan Montmorilonit, antara lapisan dalam mineral liat ini terikat satu sama lain oleh ion K⁺. Ikatan ini dengan sendirinya mengakibatkan satuan kristal pada Illit sulit bergerak satu sama lainnya, sehingga membatasi pengembangan dan pengerutannya. Akibatnya, liat ini memiliki kapasitas jerap terhadap kation dan air yang lebih rendah dibandingkan dengan Montmorilonit.

Kehadiran mika hidrat berkaitan dengan pelapukan tanah yang tidak berjalan secara hebat. Tanah dengan mineral ini kemungkinan ditemui di daerah beriklim

dingin dengan curah hujan cukup tinggi untuk mencuci garam larut dari dalam tanah.

d. Liat Nir-silikat

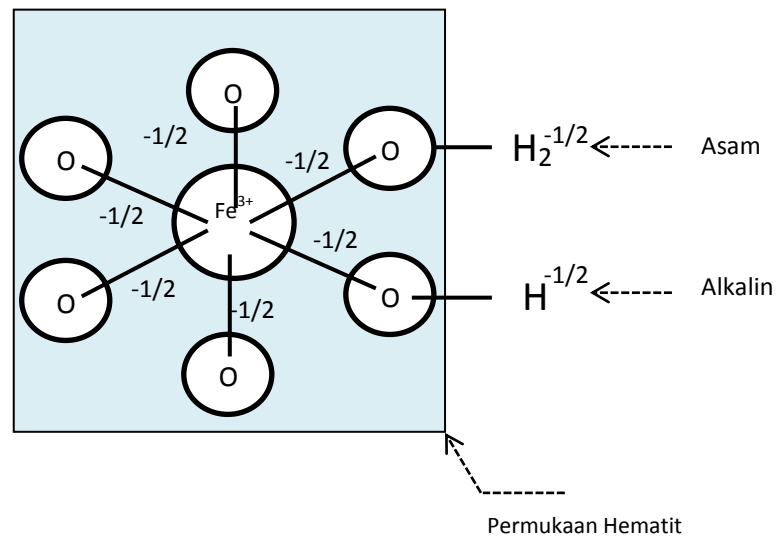
Mineral Liat Nir-Silikat tidak memiliki silikat di dalamnya. Beberapa mineral liat Nir-Silikat disajikan pada **Tabel 5.3**. Mineral ini terdiri atas oksida, hidroksida, dan hidroksioksida, yang banyak ditemui di wilayah tropika dan subtropika. Mineral-mineral ini mendominasi tanah tua dan merupakan mineral yang tidak subur karena sudah tidak mengandung unsur hara yang diperlukan oleh tanaman. Pelapukan yang hebat mengakibatkan silika dari fraksi liat berkurang secara drastis (**Reaksi 1.1**). Mineral-mineral ini memberikan warna merah, kuning, dan kelabu pada tanah. Tanah dengan mineral liat ini umumnya memiliki KTK dan tingkat kesuburan yang rendah.

Tabel 5.3 Beberapa mineral liat Nir-Silikat*.

Jenis	Rumus Kimia
Hematit	Fe_2O_3
Limonit	Fe_2O_3
Magnetit	Fe_3O_4
Fero Hidroksida	$\text{Fe}(\text{OH})_2$
Feri Hidroksida	$\text{Fe}(\text{OH})_3$
Gutit	FeOOH
Korundum	Al_2O_3
Gibsit	$\text{Al}(\text{OH})_3$
Buhmit	AlOOH
Anatase (Mineral Tanah: Titanium Oksida)	TiO_2

*Diadaptasi dari Krauskopf (1982); Lindsay (1979); Bohn dkk. (1985); Deer dkk. (1992)

Mineral Liat Nir-Silikat memiliki beberapa peranan, di antaranya adalah sebagai perekat yang dapat memperkuat agregasi partikel-partikel tanah. Peranan ini melengkapi peranan liat dan bahan organik tanah. Selain itu, Mineral Liat Nir-Silikat juga berpengaruh terhadap perubahan muatan negatif di dalam sistem tanah (**Gambar 5.7**) (Bohn dkk., 1985). Dalam suasana asam, saat ion H^+ hadir dalam konsentrasi yang tinggi, mineral ini bermuatan positif karena gugus fungsionalnya dipenuhi oleh ion-ion H^+ . Namun pada pH tinggi, mineral ini bermuatan negatif karena ion H^+ terlepas dari permukaan koloid tanah dan bereaksi dengan ion OH^- membentuk senyawa H_2O atau dengan CO_3^{2-} membentuk HCO_3^- . Dengan demikian, reaktivitas mineral ini akan muncul pada pH tinggi.



Gambar 5.7. Perkembangan muatan Mineral Liat Nir-Silikat (Diadaptasi dari Bohn dkk., 1985).

e. Bahan Organik dan Humus Tanah

Bahan organik tanah dan humus berasal dari sisa-sisa tanaman dan hewan yang kemudian membusuk dan menjadi bagian dari padatan tanah. Secara struktural dan kimia, bahan organik tanah dan humus berbeda dengan bahan mineral. Bahan organik tanah dan humus sebagian besar terdiri dari rantai karbon dilengkapi dengan unsur H dan O, dan memiliki gugus fungsional. Sedangkan bahan mineral secara kimia sebagian besar tersusun oleh Si, Al, dan O. Bahan organik tanah berbeda dengan humus dalam pemahaman bahwa bahan organik tanah adalah seluruh akumulasi sisa-sisa tanaman dan hewan yang sebagiannya telah terdekomposisi, sedangkan humus adalah bahan organik yang telah ditransformasi oleh mikroorganisme menjadi bentuk-bentuk yang relatif stabil.

Kandungan bahan organik tanah bervariasi antara jenis tanah. Kandungan bahan organik tanah *Peat* dan *Muck* umumnya >50%. Kandungan bahan organik tanah mineral dapat berkisar dari 0% dalam tanah padang pasir sampai dengan >10%, umumnya berkisar antara 0-3%, dan menurun dengan kedalaman tanah. Laporan lain menunjukkan bahwa C-Organik tanah tropika berkisar antara 1.06 - 1.55% (Alfisols), 0.8 - 1.61% (Ultisols), 2.01-2.07% (Oxisols), dan 2.44% (Mollisols). Kandungan bahan organik adalah sekitar 1.5 sampai dengan 2 kali C-Organik tanah. Amelung dkk. (1998) melaporkan bahwa fraksi liat tanah berasosiasi dengan bahan organik tanah, mencakup 43% dari total C organik, 56% dari total N, dan 62% total S. Persentase ini menurun dengan meningkatnya temperatur tanah dan menurunnya curah hujan.

Salah satu penyebab perbedaan kandungan bahan organik adalah jenis tanaman yang bertumbuh di atasnya; beberapa laporan (Chan, 1997; Studdert dkk., 1997) menunjukkan bahwa tanah yang ditanami rerumputan mengandung bahan organik lebih tinggi daripada yang ditanami tanaman pangan, sehingga rerumputan dapat dijadikan sebagai alat untuk meningkatkan atau mengembalikan kesuburan tanah akibat degradasi bahan organik (**Tabel 5.4**). Studdert dkk. (1997) juga melaporkan bahwa rotasi tanaman pangan dengan rerumputan secara nyata meningkatkan kandungan C organik tanah. Semakin sering rerumputan digunakan sebagai tanaman seling, semakin tinggi kandungan C organik tanah yang diakibatkannya.

Bahan organik tanah terdiri dari Bahan Humik dan Bahan Nir-Humik. Bahan Nir-Humik merupakan sisa-sisa tanaman yang belum terdekomposisi sehingga mudah dikenali. Bahan ini terdiri dari Polisakarida, Lignin, dan Polipeptida. Bahan Humik adalah sisa-sisa tanaman yang telah terdekomposisi dan terdiri atas tiga fraksi yang masing-masing terdiri atas campuran berbagai senyawa organik yang

Abdul Kadir Salam – 2020

tidak terdeskripsi, yaitu: Humin, Asam Humik, dan Asam Fulvik (Tan, 1986; 1993). Humin adalah Bahan Humik yang tidak larut dalam alkali. Asam Humik adalah bahan humik yang tidak larut dalam asam encer; sedangkan Asam Fulvik adalah Bahan Humik yang larut atau tidak mengendap dalam asam encer setelah dipisahkan dari Asam Humik (**Gambar 5.8**). Sebagai misal, fraksinasi asam humik dan asam fulvik terkait dengan sistem olah tanah disajikan pada **Tabel 5.5**.

Tabel 5.4. Perbedaan kandungan C dan N organik tanah Vertisols yang ditanami rumput dan tanaman pangan*.

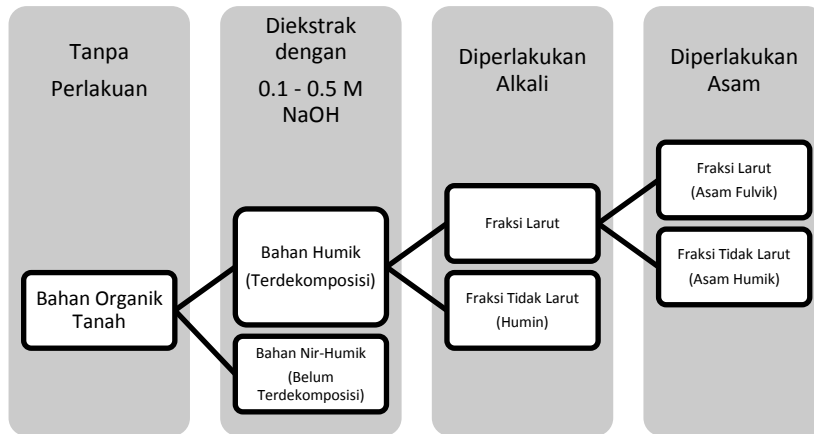
	Tanah 1		Tanah 2	
	Tanaman Pangan	Rumput	Tanaman Pangan	Rumput
pH	7.27	6.87	8.01	7.80
Total C Organik (g kg⁻¹)	7.90	13.4	4.4	7.1
Total N (g kg⁻¹)	0.9	1.5	0.7	0.9

*Diadaptasi dari Chan (1997)

Asam humik adalah produk dekomposisi bahan organik. Senyawa ini relatif stabil sehingga terakumulasi di dalam lingkungan tanah. Asam humik sangat bermanfaat dalam mengikat unsur hara sehingga dapat digunakan untuk menyangga konsentrasinya di dalam air tanah. Selain itu asam humik juga bermanfaat dalam menyangga pH tanah (Mackowiak dkk., 2001).

Secara kimia bahan organik sangat berperan karena juga memiliki muatan negatif. Muatan negatif bahan organik dan humus tanah berasal dari gugus fungsional yang terdehidrogenasi. Secara umum muatan negatif yang ditimbulkan dari berbagai gugus fungsional ini berjumlah sangat besar dan merupakan penyumbang KTK tanah yang cukup besar. Mendonca dan Rowell (1996)

melaporkan bahwa muatan negatif yang dimunculkan oleh bahan organik tanah berasal dari asam fulvik dan asam humik. Telah diketahui bahwa KTK bahan organik lebih tinggi daripada bahan mineral (**Tabel 5.6**). Oleh karena itu, rendahnya KTK tanah mineral dapat ditingkatkan dengan perlakuan bahan organik.



Gambar 5.8. Fraksionasi bahan humik menjadi humin, asam humik, dan asam fulvik.

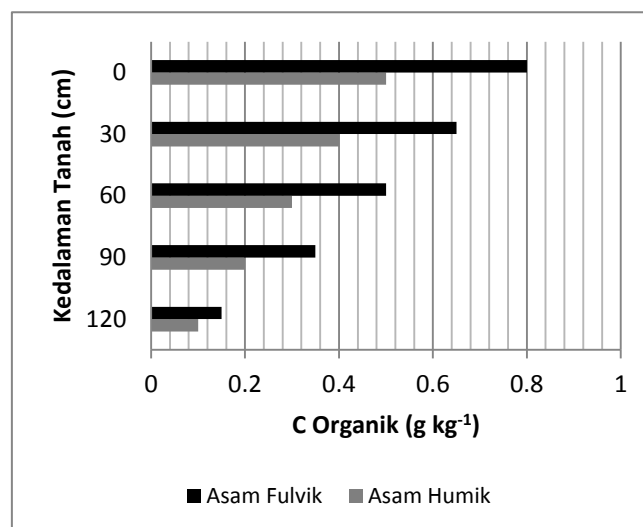
Tabel 5.5 Fraksionasi asam fulvik dan asam humik tanah dengan beberapa sistem olah tanah*.

Sistem Olah Tanah	C-Total	Asam Fulvik	Asam Humik
 %		
Intensif	1.80	15.56	142
Minimum	1.86	27.60	66.42
Tanpa Olah	2.14	19.59	59.91

*Diadaptasi dari Sarno dkk. (1998)

Menurut laporan Medonca dan Rowel (1996), dalam penelitian mereka dengan sebuah tanah Oxisol dari Brazil, kuantitas asam fulvik lebih tinggi daripada asam humik. Kuantitas asam fulvik dan asam humik lebih tinggi di topsoil dan menurun dengan kedalaman tanah. Penyederhanaan konsentrasi kedua komponen bahan organik tanah ini di dalam tanah disajikan pada **Gambar 5.9**.

Muatan negatif yang berasal dari bahan organik dan humus berkembang tergantung pada pH tanah. Dalam suasana asam saat ion H^+ tinggi, muatan negatif bahan organik dan humus rendah, karena gugus fungsional dijenuhi oleh ion H^+ yang terjerap, yang dapat menyebabkan perubahan muatan negatif tanah menjadi muatan positif (**Gambar 3.9**). Dengan meningkatnya pH tanah, secara perlahan sebagian ion H^+ yang menjenuhi gugus fungsional terdisosiasi dan bereaksi dengan ion OH^- yang naik akibat meningkatnya pH atau ion CO_3^{2-} membentuk H_2O dan HCO_3^- . Peningkatan pH akhirnya mengakibatkan gugus fungsional bahan organik dan humus menjadi bermuatan negatif.



Gambar 5.9. Konsentrasi asam fulvik dan asam humik di dalam tanah (Medonca dan Rowel, 1996).

Tabel 5.6. KTK bahan organik dan mineral tanah.

Bahan	KTK ($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$)	Kualifikasi
Kaolinit	2 -10	Rendah
Illit	20 – 30	Sedang
Montmorilonit	80-100	Tinggi
Humus	50-200	Tinggi

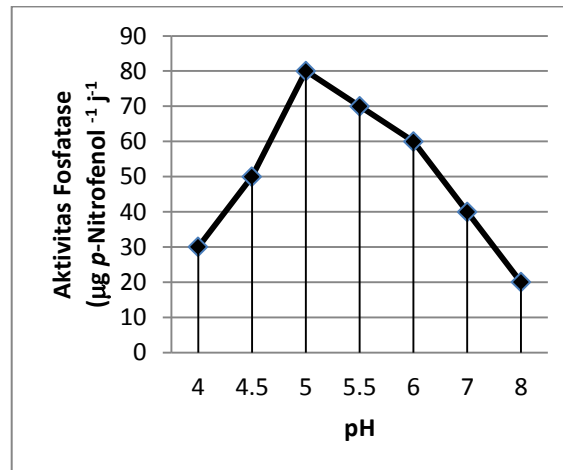
5.3 Reaksi Tanah

Satu di antara dua parameter lingkungan yang terpenting adalah reaksi tanah (pH). Reaksi tanah sangat berpengaruh pada berbagai sifat dan reaksi kimia yang terjadi di dalam tanah. Beberapa di antara sifat tanah yang terpengaruh oleh pH tanah adalah KTK, ketersediaan unsur hara, populasi dan aktivitas mikroorganisme, dan aktivitas enzim tanah. Berbagai reaksi kimia juga diatur oleh pH tanah. Di antara reaksi-reaksi kimia tersebut adalah pelapukan tanah, pertukaran kation dan pertukaran anion, perombakan P-organik menjadi P nir-organik.

Secara umum, KTK tanah di wilayah tropika dengan muatan yang bersumber dari Mineral Liat Tipe 1:1, Mineral Liat Nir-Silikat, dan bahan organik/humus meningkat dengan meningkatnya pH tanah (Salam, 1999; 2001; Bang dan Hesterberg, 2004; Adams dkk., 2004; Quaghebeur dkk., 2005; He dkk., 2006; Brown dkk., 2009). Berbarengan dengan itu, ketersediaan unsur-unsur basa dan P secara umum meningkat dengan peningkatan pH. Sebaliknya, ketersediaan unsur-unsur logam menurun karena sebagian darinya terikat kuat oleh koloid tanah yang bermuatan negatif atau mengendap dalam bentuk mineral sekunder.

Beberapa jenis mikroorganisme sangat dipengaruhi oleh pH lingkungan tanah. Misalnya, jamur akan bertumbuh dan berkembang dengan baik pada pH relatif asam sedangkan bakteri pada pH relatif tinggi. Karenanya, aktivitas enzim yang diproduksi juga berubah terkait dengan pertumbuhan dan perkembangan mikroorganisme. Secara kimia, pH tanah berpengaruh langsung terhadap aktivitas

enzim. Misalnya, aktivitas fosfatase meningkat pada rentang pH tertentu sampai pH maksimum, dan kemudian menurun dengan meningkatnya pH di atas pH maksimum (**Gambar 5.10**).



Gambar 5.10. Pengaruh pH terhadap perubahan aktivitas fosfatase dalam tanah.

Reaksi tanah juga sangat memengaruhi proses pelapukan tanah. Pelapukan mineral Albit seperti diutarakan sebelumnya (**Reaksi 1.1**) sangat tergantung pada kehadiran ion H^+ ; semakin tinggi konsentrasi ion H^+ di dalam tanah, yang artinya semakin rendah pH tanah, semakin cepat pelapukan mineral Albit menghasilkan berbagai mineral sekunder. Perombakan bahan organik yang mengandung P untuk menghasilkan P nir-organik (ortofosfat) juga sangat dipengaruhi oleh pH tanah. Perombakan akan berlangsung lebih cepat pada pH optimum saat aktivitas enzim fosfatase relatif tinggi.

Pertukaran kation dan anion di tanah tropika sangat dipengaruhi oleh pH tanah karena muatan tanah sangat dipengaruhi oleh pH tanah. Pada pH tinggi, saat muatan koloid tanah negatif, lebih banyak kation yang terjerap. Oleh karenanya, pada pH tinggi pertukaran kation lebih dominan daripada pertukaran anion.

Abdul Kadir Salam – 2020

Sebaliknya, pada pH rendah, saat koloid tanah bermuatan positif, yang lebih dominan adalah proses pertukaran anion karena lebih banyak anion yang terjerap oleh muatan positif koloid tanah.

a. Pengertian pH

Reaksi atau dilambangkan dengan pH menunjukkan derajat keasaman suatu media. Nilai pH di bawah 7 dikategorikan asam sedangkan nilai di atas 7 dikategorikan alkalin atau basa, dan nilai 7 dikategorikan netral. Nilai pH menunjukkan konsentrasi ion H^+ dalam mol per liter atau Molar. Untuk menghitung pH dipergunakan formula sebagai berikut:

$$pH = -\log [H^+] \dots\dots \text{Pers. 5.1}$$

Dengan menggunakan formula ini, kita dapat menghitung nilai pH bila konsentrasi ion H^+ diketahui. Misalnya, sebuah larutan dengan konsentrasi ion $H^+ = 0.001M$ memiliki $pH = -\log (0.001)$ atau $pH = 3$. Nilai pH berhubungan dengan nilai pOH dengan formula sebagai berikut:

$$pH + pOH = 14 \dots\dots \text{Pers. 5.2}$$

Dengan menggunakan formula ini, kita dapat menghitung nilai pOH larutan dengan konsentrasi ion $H^+ = 0.001 M$ di atas. Karena $pH = 3$, maka $pOH = 14 - pH$ atau $pOH = 11$.

b. Reaksi (pH) Tanah

Reaksi tanah menunjukkan pH tanah. Untuk mendapatkan nilai pH dan pOH tanah juga digunakan formula yang sama (**Pers. 5.1 dan 5.2**). Klasifikasi kriteria pH tanah disajikan pada **Tabel 5.7**. Tanaman pada umumnya hidup pada tanah dengan pH alami 5.5 – 8.3 dan yang umum untuk pertumbuhan tanaman produksi adalah 6.5 – 7.8, tergantung pada jenis tanamannya. Pada pH yang rendah tanaman tidak dapat bertumbuh dan berkembang dengan baik karena beberapa permasalahan,

baik yang secara langsung terkait dengan konsentrasi ion H^+ maupun yang secara tidak langsung akibat berbagai perubahan kimia tanah yang ditimbulkan olehnya. Demikian juga pada pH terlalu tinggi, tanaman akan sulit bertumbuh dan berkembang karena pekatnya konsentrasi ion OH^- atau berbagai perubahan kimia tanah yang ditimbulkannya.

Tabel 5.7. Klasifikasi rentang pH tanah*.

Klasifikasi	Rentang pH
Netral	6.5 – 7.5
Sangat Bagus	6.5 – 7.8
Bagus untuk Tanaman Pertanian	5.5 – 8.3

*Diadaptasi dari Harpstead dkk. (1988)

Di laboratorium, pH tanah biasa ditetapkan dengan menggunakan pH-meter dilengkapi dengan elektrode yang sensitif terhadap ion H^+ (*H^+ ion selective electrode*). Penetapan pH dapat dilakukan dalam berbagai larutan dengan berbagai perbandingan padatan/cairan. Larutan yang paling banyak digunakan adalah air dan 1 M KCl. Pengukuran dengan 1 M KCl secara umum akan menghasilkan nilai pH lebih rendah daripada pengukuran dengan menggunakan air, khususnya pada tanah dengan koloid bermuatan negatif. Semakin tinggi muatan negatif koloid tanah akan semakin tinggi pula ΔpH yang ditimbulkannya. Dalam hal ini, ion K^+ dari larutan KCl akan 'mengusir' sebagian H^+ pada koloid tanah sehingga konsentrasi ion H^+ di dalam air tanah meningkat dan dengan sendirinya pH yang terukur lebih rendah. Secara khusus pH H_2O menunjukkan keasaman aktual dan pH KCl menunjukkan keasaman potensial.

Nisbah padatan dan larutan pengekstrak sangat berpengaruh terhadap hasil pengukuran pH. Semakin tinggi volume larutan pengekstrak akan menyebabkan menurunnya konsentrasi ion H^+ di dalam larutan tanah, sehingga akan menyebabkan hasil penetapan pH yang lebih tinggi. Oleh karena itu, pada saat kita mengungkapkan hasil pengukuran pH, jenis larutan pengekstrak dan nisbah padatan/larutan harus dituliskan. Misalnya, pH H_2O 1:1 = 5.73 atau pH KCl 1:2 =

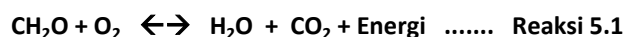
4.68. Dengan cara penulisan demikian akan lebih mudah bagi pengguna untuk menginterpretasi dan membandingkannya dengan nilai pH yang lainnya yang ditentukan dengan cara yang sama.

Penetapan pH tanah di lapang dapat juga dilakukan dengan menggunakan pH-meter yang memang dirancang untuk pengukuran lapang. Penetapan pH di lapang juga harus memperhatikan kaidah-kaidah penetapan pH di laboratorium. Dalam keadaan tertentu, misalnya dalam survey tanah, sering sekali kita menetapkan pH tanah dengan menggunakan kertas lakmus. Dalam penetapan ini, contoh tanah lapang diaduk dengan menggunakan air dengan nisbah padatan/air kira-kira 1:1. Setelah campuran dianggap rata, kertas lakmus direndam dalam adukan tersebut dan kemudian dibiarkan beberapa saat. Kombinasi warna yang terjadi akibat perendaman di dalam adukan lalu dibandingkan dengan daftar warna standar untuk menetapkan nilai pH tanah. Nilai pH yang diperoleh seperti ini tidak akurat, hanya merupakan perkiraan, yang kemudian perlu diulang dengan teknik pengukuran baku di laboratorium.

Reaksi tanah sangat dinamis, selalu berubah dengan waktu di bawah pengaruh berbagai faktor lingkungan. Pada saat hujan turun dan air hujan memenuhi pori tanah, konsentrasi ion H^+ di dalam pori tanah mengencer, sehingga mengakibatkan peningkatan pH. Sebaliknya, pada musim kering saat kadar air di dalam pori-pori tanah minimum, pH tanah akan menurun karena konsentrasi ion H^+ meningkat. Dalam jangka lebih panjang, tingginya kadar air tanah pada saat hujan akan mengakibatkan tercucinya unsur-unsur basa. Proses pencucian ini akan mengakibatkan penurunan kejenuhan basa dan pH tanah.

Dengan demikian keberadaan air di dalam sistem tanah sangat memengaruhi dinamika pH tanah. Karena pH tanah merupakan faktor pengatur utama, perubahan ini juga akan mengakibatkan perubahan sifat-sifat kimia tanah lainnya seperti ketersediaan unsur hara dan KTK.

Reaksi tanah juga akan berfluktuasi karena kegiatan biologi tanah dan akar tanaman. Dalam aktivitasnya, biologi tanah dan akar tanaman akan memperoleh energi dengan mengoksidasi hidrokarbon dalam proses respirasi. Proses ini kira-kira akan berjalan sebagai berikut:



Selain energi, dalam reaksi ini juga dihasilkan CO_2 , yang di dalam tanah akan bereaksi dengan air membentuk ion H^+ (**Reaksi 2.1**). Terbentuknya ion H^+ dari proses ini akan meningkatkan konsentrasi ion H^+ di dalam sistem tanah dan dengan sendirinya menurunkan pH tanah.

Abdul Kadir Salam – 2020

Selain menurunkan pH tanah melalui proses di atas, akar tanaman juga akan mengekskresikan ion H^+ pada saat menyerap kation. Pelepasan ion H^+ ini merupakan proses alami untuk mempertahankan kesetimbangan massa dan muatan di sekitar akar tanaman. Bila akar tanaman menyerap sebuah kation Ca^{2+} maka akar tanaman akan mengeluarkan dua buah ion H^+ . Dengan cara demikian akar tanaman dapat 'menjaga' kesetimbangan massa dan elektrostatis di sekitar perakaran tanaman. Namun demikian, peningkatan konsentrasi ion H^+ di sekitar perakaran tanaman menurunkan pH tanah.

Selain sumber-sumber alami seperti itu, terdapat banyak sekali sumber keasaman tanah, di antaranya: (a) hidrolisis ion Al^{3+} (**Reaksi 5.9**), (2) hujan asam, (3) pemupukan Urea dan proses nitrifikasi (**Reaksi 2.3**, **Reaksi 6.4** dan **Reaksi 6.6**). Penurunan pH tanah akibat pemberian Urea dengan berbagai sistem olah tanah jangka panjang disajikan pada **Tabel 5.8**. Menurut Boulman dkk. (1995), penurunan pH akibat penerapan Urea diakibatkan oleh dua hal: (a) produksi ion H^+ dari hidrolisis Urea dan (b) menurunnya Ca-dd dan Mg-dd akibat pertukaran kation tersebut dengan ion NH_4^+ . Penurunan pH akibat penerapan Urea jangka panjang juga dilaporkan meningkatkan Al-dd dan Kejenuhan Al serta menurunkan Ca-dd dan Mg-dd (Schroder dkk., 2011). Karena Al^{3+} merupakan sumber keasaman, maka fakta ini memperburuk kondisi pH tanah. Boulman dkk. (1995) melaporkan bahwa pengaruh penurunan pH oleh penambahan Urea masih lebih rendah dibandingkan dengan penggunaan amoniak (NH_3).

c. Peranan pH Tanah

Reaksi tanah sangat berpengaruh terhadap berbagai sifat kimia dan biologi tanah serta berbagai reaksi kimia yang terjadi di dalam tanah. Ketersediaan unsur hara di dalam tanah umumnya sangat terpengaruh oleh perubahan pH tanah. Secara umum, ketersediaan unsur hara makro seperti Ca, Mg, K, dan P meningkat dengan meningkatnya pH tanah; sebaliknya ketersediaan unsur hara mikro kelompok logam seperti Fe, Mn, Zn, dan Cu menurun dengan meningkatnya pH tanah (**Gambar 5.11**). Ketersediaan unsur hara mikro nir-logam seperti Mo meningkat dengan meningkatnya pH tanah (**Gambar 5.12**). Hubungan ketersediaan Mo dengan pH tanah mirip dengan hubungan ketersediaan P dengan pH tanah. Ini terjadi karena ada kemiripan kimia antara kedua unsur tersebut, walau pun peranannya untuk tanaman berbeda.

Tabel 5.8. Penurunan pH tanah akibat penerapan Urea jangka panjang*.

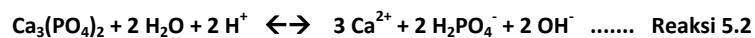
Olah Tanah	N Urea (kg ha ⁻¹)		
	0	100	200
Olah Tanah Intensif	5.03	4.83	4.44
Olah Tanah Minimum	5.18	4.96	4.78
Tanpa Olah Tanah	5.06	4.89	4.75
Rataan	5.09	4.89	4.66

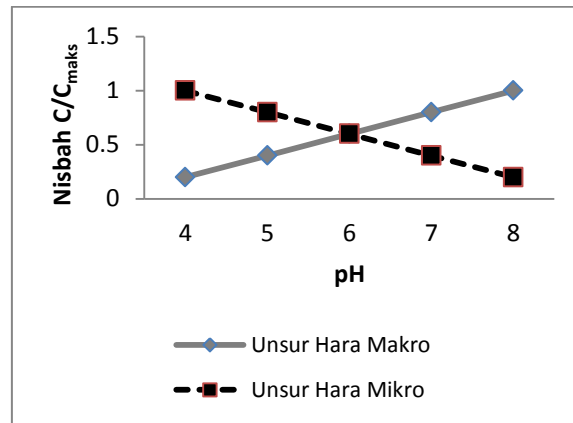
*Diadaptasi dari Salam dkk. (1998)

Pelapukan tanah, yang merupakan proses pelepasan unsur hara struktural dari mineral tanah, juga meningkat dengan menurunnya pH tanah (**Gambar 3.4**). Pelepasan unsur hara struktural lebih dahsyat terjadi pada pH rendah, karena ion H⁺ yang banyak terdapat di dalam sistem tanah akan berperan sebagai *Attacking Agent* yang mampu menghancurkan struktur mineral sehingga dapat membebaskan unsur hara ke dalam air tanah.

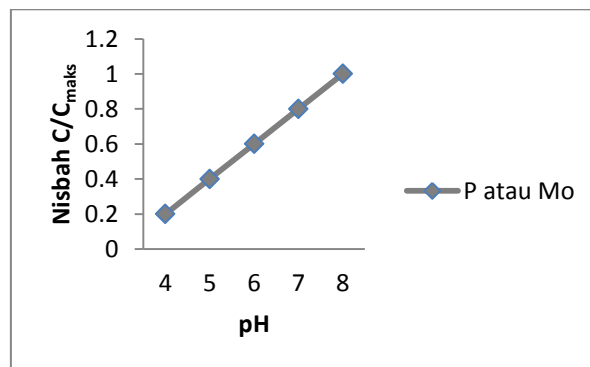
Selain pada pH, derajat pelepasan unsur hara juga sangat tergantung pada jenis tanah. Tanah subur yang masih banyak mengandung mineral primer (misalnya Mollisols) membebaskan unsur hara yang lebih banyak daripada tanah tua (misalnya Ultisols) yang mineraloginya didominasi oleh mineral liat silikat (**Tabel 1.1** dan **Tabel 3.8**), kecuali dalam pelepasan Al, yang lebih tinggi pada tanah Ultisols karena tanah ini didominasi oleh mineral liat silikat.

Dengan demikian, pelarutan mineral-mineral tertentu yang diperlakukan sebagai pupuk atau pembenah tanah seperti batuan fosfat juga akan terjadi lebih dahsyat pada tanah dengan pH rendah. Misalnya, pelapukan batuan fosfat dalam tanah lembab dengan pH rendah akan berjalan sebagai berikut:





Gambar 5.11. Hubungan perubahan ketersediaan unsur hara makro dan unsur hara mikro dengan pH (C = konsentrasi, C_{maks} = konsentrasi maksimum).



Gambar 5.12. Hubungan antara ketersediaan P dan Mo dengan pH tanah (C = konsentrasi, C_{maks} = konsentrasi maksimum).

Namun demikian, kecepatan pelarutannya akan melambat dengan berjalannya waktu karena pelapukan batuan fosfat secara perlahan akhirnya akan meningkatkan pH tanah seperti layaknya bahan kapur. Dalam pelapukan batuan fosfat dihasilkan ion Ca^{2+} dan OH^- yang dapat meningkatkan pH tanah. Dalam hal ini peningkatan pH tanah akan menurunkan proses pelapukan batuan fosfat.

Reaksi tanah juga akan berpengaruh terhadap biologi dan reaksi biokimia tanah. Seperti telah diungkapkan, sebagian mikroorganisme seperti jamur akan bertumbuh dan berkembang baik pada pH relatif rendah; sebaliknya, sebagian bakteri akan lebih cocok bertumbuh dan berkembang pada pH alkalin. Oleh karena itu, pH tanah juga berpengaruh terhadap populasi dan aktivitas mikroorganisme, termasuk dalam menghasilkan enzim tanah. Enzim tanah adalah senyawa biokimia yang berperan menjadi katalisator reaksi kimia, yang bertugas mempercepat reaksi dekomposisi bahan organik dengan komposisi tertentu.

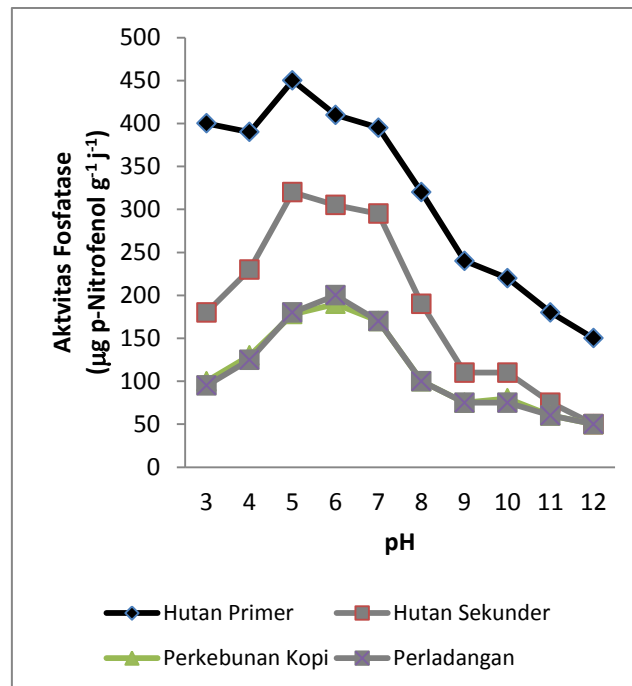
Aktivitas enzim tertentu seperti fosfatase dilaporkan sangat dipengaruhi oleh perubahan pH tanah. Enzim yang berperan dalam perombakan P-organik menjadi P-nir-organik ini aktivitasnya meningkat dengan meningkatnya pH tanah sampai pH Optimum, dan menurun dengan meningkatnya pH di atas pH Optimum. Reaksi tanah (pH) Optimum adalah nilai pH saat aktivitas enzim tersebut maksimum. Nilai ini berbeda antara satu jenis tanah dengan tanah yang lainnya (**Gambar 5.13**). Tanah dari Hutan Primer, Hutan Sekunder, Perkebunan Kopi, dan Perladangan di Bukit Ringgis, Lampung Barat, memiliki pH Optimum masing-masing 5.0, 5.5, 6.3, dan 6.0 (Salam dkk., 1998d). Nilai pH Optimum bergeser ke pH yang lebih alkalin berkaitan dengan degradasi lahan dari Hutan Primer ke Hutan Sekunder ke Perkebunan Kopi dan Perladangan.

Menurut sebuah laporan, tanah Gedong Meneng (Bandar Lampung) dan Banjar Agung (Lampung Timur) didominasi oleh Fosfatase Asam, yang berubah dengan perubahan pH tanah. Penambahan 4 ton CaCO_3 per hektare menurunkan aktivitas Fosfatase Asam (Salam dkk., 1999h). Ini menunjukkan bahwa rentang pH percobaan lebih tinggi daripada posisi pH Optimum, sehingga peningkatan pH akibat pengapuran menyebabkan penurunan aktivitas enzim fosfatase.

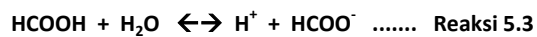
d. Kapasitas Sangga Tanah

Dalam ilmu asam dan basa, terdapat larutan *buffer* atau **larutan penyangga**. Larutan penyangga dapat menahan perubahan pH sampai derajat tertentu akibat pengenceran/pengentalan atau penambahan sedikit asam atau sedikit basa. Hal ini

terjadi karena di dalam larutan penyangga terdapat kombinasi antara asam lemah dengan garamnya dengan konsentrasi sedemikian rupa sehingga memiliki pH tertentu yang tidak mudah berubah akibat pengenceran/pengentalan atau penambahan sedikit asam atau basa. Misalnya, sebuah larutan penyangga yang tersusun dari 0.400 M asam formik dan 1.00 M natrium formik memiliki pH 4.15. Nilai pH ini dijaga oleh reaksi kesetimbangan sebagai berikut:

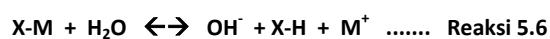
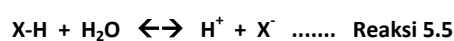


Gambar 5.13. Hubungan aktivitas fosfatase dengan pH beberapa jenis tanah di Lampung Barat (Diadaptasi dari Salam dkk., 1998d).



Ion H^+ dari asam yang ditambahkan akan dinetralisasi oleh ion $HCOO^-$ dengan membentuk molekul air dan asam $HCOOH$; sedangkan penambahan basa akan dinetralisasi dengan membentuk molekul air dan garam $CHCOONa$. Dengan demikian, penambahan tersebut tidak mengubah pH larutan (Skoog dan West, 1982).

Dalam beberapa hal, tanah merupakan sistem penyangga yang dapat menahan perubahan pH akibat pengenceran/pengentalan atau penambahan sedikit asam maupun basa (Thomas dan Hargrove, 1984). Dalam kaitannya dengan sistem penyangga ini, tanah adalah sebuah asam lemah (X-H, dengan X- adalah koloid tanah) yang berkesetimbangan dengan ion H^+ dalam larutan tanah. Sebagian koloid tanah berikatan dengan kation membentuk garam (X-M, dengan M adalah kation dapat dipertukarkan). Asam dan basa tanah akan berkesetimbangan dengan ion H^+ dan OH^- di dalam larutan tanah sebagai berikut:

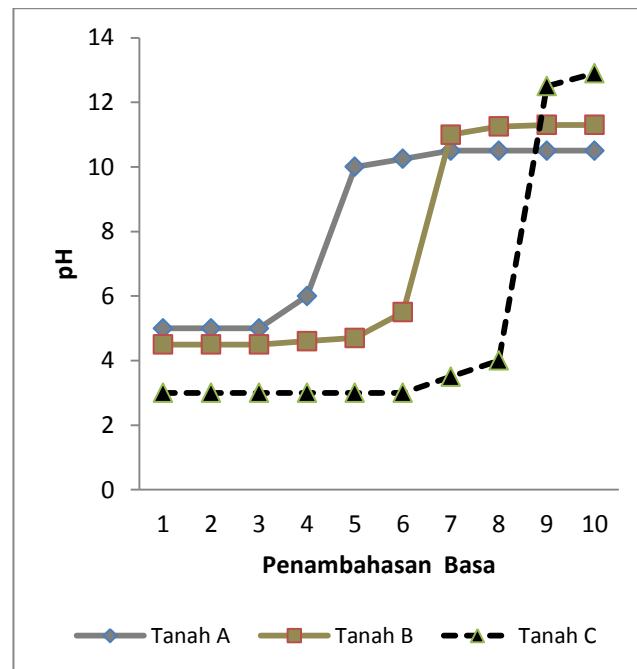


Kombinasi di atas merupakan sebuah sistem penyangga pH, yang dapat menahan perubahan pH tanah akibat pengenceran/pengentalan serta penambahan asam atau basa dalam jumlah terbatas. Ion H^+ dari asam yang ditambahkan akan dinetralisasi dengan membentuk asam X-H; sedangkan penambahan basa akan dinetralisasi dengan membentuk molekul air dan garam X-M. Dengan demikian, penambahan tersebut tidak mengubah pH tanah.

Kemampuan tanah untuk menahan perubahan pH atau **Kapasitas Sangga** tanah berbeda-beda. Sebagian tanah memiliki kapasitas sangga relatif tinggi, sehingga walaupun ditambah asam atau basa dalam jumlah tinggi, perubahan pH yang diakibatkannya minimum. Namun demikian ada juga tanah dengan kapasitas sangga rendah, sehingga pH-nya mudah berubah dengan penambahan sedikit asam atau basa. Contohnya adalah tanah dengan kadar Al-dd rendah. Tanah dengan kadar Al-dd rendah akan lebih mudah dinaikkan pH-nya dibandingkan tanah dengan kadar Al-dd tinggi.

Kapasitas Sangga tanah akan terlihat dengan jelas pada saat dilakukan pengapuran. Peningkatan pH tanah ber-Kapasitas Sangga rendah akan lebih cepat terjadi dibandingkan dengan tanah berkapasitas sangga tinggi (**Gambar 5.14**). Kapasitas Sangga Tanah A lebih rendah daripada Kapasitas Sangga Tanah B, sehingga penambahan basa atau kapur dengan jumlah yang sama (misalnya penambahan 5 unit basa pada **Gambar 5.14**) telah meningkatkan pH Tanah A

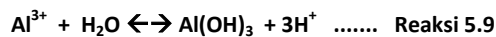
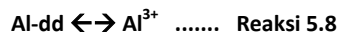
secara signifikan, sedangkan pH Tanah B belum mengalami peningkatan yang cukup berarti. Demikian juga Tanah C, yang memiliki kapasitas sangga yang tertinggi di antara ketiga tanah tersebut.



Gambar 5.14. Perubahan pH tanah dengan kapasitas sangga yang berbeda.

Tanah dengan kapasitas sangga rendah biasanya memiliki KTK rendah sehingga juga memiliki H-dd dan Al-dd yang rendah. H-dd dan Al-dd merupakan sumber kemasaman potensial yang menentukan kapasitas sangga tanah (Rendig dan Taylor, 1989). Pada saat tanah dikapur, bahan kapur pada awalnya akan menetralkan ion H⁺ larut. Bila ion H⁺ larut menurun karena telah dinetralkan oleh

ion OH^- akibat pengapuran, maka secara perlahan H-dd dan Al-dd akan terbebaskan dan meningkatkan konsentrasi ion H^+ dalam larutan tanah dengan proses sebagai berikut:



Proses ini menahan peningkatan pH sampai H-dd dan Al-dd terkuras. Dengan demikian, H-dd dan Al-dd sangat menentukan jumlah kapur yang diperlukan. Semakin tinggi H-dd dan Al-dd semakin tinggi pula kapur yang diperlukan untuk menetralsasinya.

Karena pH tanah merupakan peubah utama yang sangat memengaruhi berbagai sifat dan proses-proses di dalam sistem tanah, maka pH tanah memang harus dipertahankan pada pH tertentu. Oleh karena itu sistem penyanggaan pH tanah harus digunakan dalam pengelolaan tanah.

e. Tanah Asam dan Tanah Alkalin

Reaksi tanah berkisar antara sangat rendah sekitar pH 2 sampai dengan sangat tinggi sekitar pH 11. Tanah dengan pH di bawah 7 biasanya disebut **Tanah Asam**, dan yang pH-nya di atas 7 disebut **Tanah Alkalin**. Namun demikian, biasanya pH sekitar 6-8 tidak dikelompokkan ke dalam keduanya. Tanah asam biasanya ber-pH < 6 dan tanah alkalin ber-pH > 8. Tanah dengan pH 6.5 – 7.8 dianggap sangat bagus dan umumnya pH 5.5-8.3 bagus untuk tanaman pertanian. Pengelompokan ini bersifat sangat subyektif dan tergantung pada keperluannya.

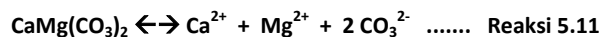
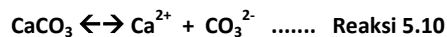
Namun demikian, ada beberapa kesepakatan umum terkait dengan tanah asam dan tanah alkalin. Tanah asam umumnya ber-pH rendah, yang biasanya merupakan tanah tua yang telah terlapuk lanjut, umumnya terdapat di daerah tropika dengan temperatur yang tinggi dan curah hujan yang tinggi. Tanah asam biasanya tidak subur dengan ketersediaan unsur hara relatif rendah, mineralogi didominasi oleh mineral liat silikat atau liat nir-silikat seperti oksida, hidroksida, dan hidroksioksida. Dengan demikian, nilai KTK tanah asam rendah dibarengi dengan

KB yang rendah dan KAl yang tinggi. KAl tinggi akan menurunkan ketersediaan P, karena sebagian P akan berikatan dengan ion-ion Al^{3+} .

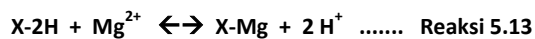
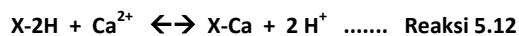
Tanah asam berkembang di wilayah basah dengan curah hujan tinggi, sehingga pencucian oleh air hujan mengakibatkan translokasi ion basa dari lapisan atas ke lapisan bawah dan akhirnya kembali ke laut melalui air bawah tanah. Menurunnya KB akan menyebabkan menurunnya pH tanah. Beberapa praktik pertanian, seperti penanaman dan penambahan bahan organik atau pupuk urea, juga meningkatkan terjadinya proses pengasaman tanah. Proses ini dapat dinetralisasi dengan penambahan bahan kapur.

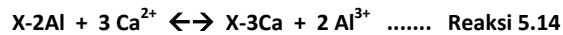
Pengelolaan tanah asam harus dilakukan dengan memperhatikan sifat-sifat di atas. Karena pH tanah asam rendah, maka usaha yang dilakukan adalah menaikkan nilai pH sampai dengan nilai yang dapat menjamin perbaikan sifat-sifat tanah lain. Salah satunya adalah dengan pengapuran. Meningkatnya pH tanah akibat pengapuran akan menyebabkan meningkatnya KTK tanah karena sebagian besar muatan tanah sangat tergantung pada pH tanah. Meningkatnya KTK tanah juga akan dibarengi dengan meningkatnya KB dan menurunnya KAl. Menurunnya KAl juga akan menurunkan pengikatan P oleh Al sehingga meningkatkan ketersediaan P di dalam tanah. Namun demikian, karena mineral penyusun tanah asam didominasi oleh mineral tua, maka pemupukan untuk menambah ketersediaan unsur hara juga diperlukan.

Banyak bahan kapur yang dapat digunakan untuk meningkatkan pH tanah asam, di antaranya yang banyak digunakan adalah **Kalsit** (CaCO_3) dan **Dolomit** ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$). Kelebihan Dolomit adalah, selain mengandung Ca, juga mengandung Mg, yang juga merupakan unsur hara makro bagi tanaman. Dolomit dapat diterapkan di lahan dengan tanah yang miskin Mg. Kedua bahan kapur ini di dalam tanah akan mengalami reaksi kimia sebagai berikut:

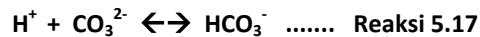
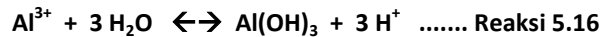


Ion-ion Ca^{2+} dan Mg^{2+} akan mengusir H-dd dan Al-dd dari permukaan koloid tanah dan menetralkannya menjadi HCO_3^- dan $\text{Al}(\text{OH})_3$ melalui proses pertukaran kation dan pengendapan sebagai berikut:





dengan X adalah koloid tanah bermuatan negatif. Ion Al^{3+} akan segera terhidrolisis dan ion H^+ akan dinetralsasi oleh ion CO_3^{2-} membentuk ion-ion bikarbonat (HCO_3^-) sebagai berikut:



Dengan rentetan reaksi seperti ini, Kalsit atau Dolomit pada akhirnya akan dapat meningkatkan pH tanah. Dengan reaksi kimia tersebut maka sumber keasaman aktif (ion H^+ dalam larutan tanah) dan sumber kemasaman potensial (H -dd dan Al -dd dan ion Al^{3+}) dapat dinetralsasi, ketersediaan Ca dan Mg ditingkatkan, dan pH tanah meningkat sampai ke tingkat yang diinginkan.

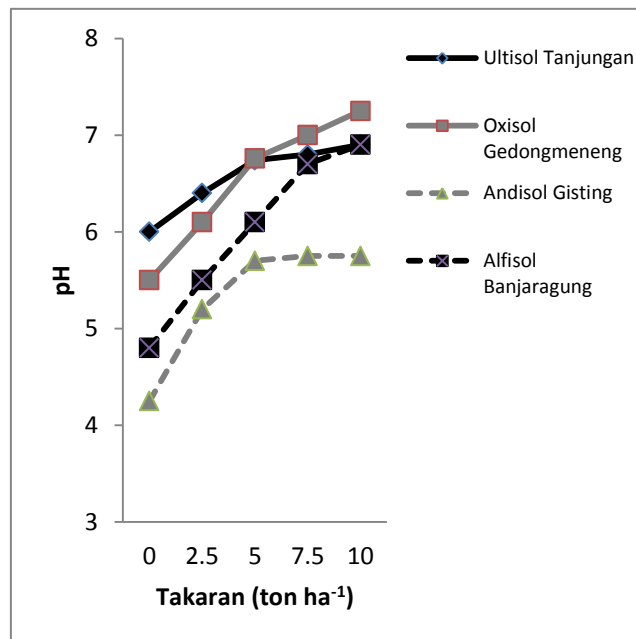
Peningkatan pH tanah akibat penambahan kapur berbeda tergantung pada sifat tanah, di antaranya adalah kapasitas sangga dan faktor-faktor yang berkaitan dengannya seperti tekstur tanah. Tanah berliat umumnya memiliki kapasitas sangga tinggi terhadap peningkatan pH tanah dan, karena itu, memerlukan jumlah kapur yang lebih banyak untuk meningkatkan pH-nya dibandingkan dengan tanah pasir atau berpasir. Misalnya, untuk meningkatkan pH tanah sebesar 1 satuan dari 4.5 ke 5.5 diperlukan kapur sebanyak 1 ton ha^{-1} untuk tanah bertekstur pasir dan diperlukan 3 ton ha^{-1} untuk tanah lempung berpasir. Tanah organik memerlukan jumlah kapur yang lebih tinggi untuk meningkatkan pH-nya sebesar 1 satuan dari 4.5 menjadi 5.8 (**Tabel 5.9**).

Salah satu cara paling akurat dalam menentukan kebutuhan kapur tanah adalah dengan melakukan **Titration Langsung** dengan menggunakan kapur yang akan digunakan untuk mengapur. Contoh tanah diperlakukan dengan beberapa takaran kapur dan diinkubasikan sampai rentang waktu tertentu dan pH-nya kemudian ditetapkan. Kebutuhan kapur dapat ditetapkan berdasarkan kurva yang terbentuk dengan menggunakan pH sebagai Sumbu X dan penambahan kapur sebagai Sumbu Y atau sebaliknya (**Gambar 15**). Kebutuhan kapur kemudian dapat ditentukan secara langsung dengan menggunakan kurva atau dihitung berdasarkan persamaan kurva yang tersusun. Salah satu pengembangan metode ini telah dilaporkan (Salam,2000; Liu dkk., 2004).

Tabel 5.9. Perkiraan kebutuhan kapur untuk meningkatkan pH tanah dengan tekstur berbeda.

Tekstur Tanah	Kapur (ton ha ⁻¹)
Pasir	1
Lempung Berpasir	2
Lempung Liat	4
Tanah Organik (<i>Peat</i>)	8

*Singer dan Munns (1987), **Untuk meningkatkan pH dari 4.5 ke 5.5



Gambar 5.15. Titrasi langsung beberapa tanah dari Lampung dengan CaCO₃ (Salam, 2000).

Dalam beberapa hal, pelapukan Apatit dan berbagai pupuk turunannya (TSP, SP 36, KH_2PO_4) yang diterapkan ke dalam tanah juga dapat meningkatkan pH tanah (**Reaksi 5.2**, **Gambar 5.16**) (Salam, 1997b). Oleh karena itu, penerapan apatit di lahan pertanian, selain dapat meningkatkan ketersediaan unsur hara Ca dan P, juga meningkatkan pH tanah. Meningkatnya pH tanah memiliki dampak lain terhadap sifat-sifat tanah.

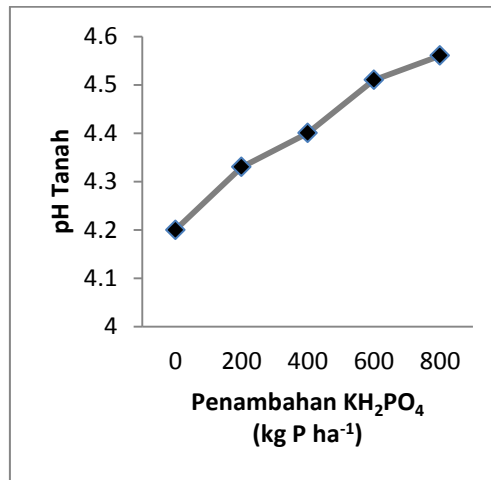
Tanah alkalin memiliki sifat-sifat yang secara umum kebalikan dari tanah asam. Tanah ini berkembang di daerah arid dan semiarid. Ion yang dihasilkan melalui proses pelapukan mineral umumnya bersifat basa dan curah hujan yang terjadi tidak cukup untuk mencuci unsur ini dari tanah. Selain itu, proses penguapan akan mengakibatkan perkolasi negatif dalam pengertian air bergerak secara kapiler ke atas di dalam tubuh tanah. Proses ini akhirnya mengakibatkan terjadinya akumulasi basa di permukaan tanah.

Karena pH tanah alkalin relatif tinggi, maka sebagian sifat tanah juga bergeser. KTK tanah yang mengandung mineral liat Tipe 1:1 dan bahan organik lebih tinggi karena terjadinya dehidrogenasi gugus fungsional (**Gambar 3.7** dan **Gambar 3.9**). Keberadaan muatan negatif pada koloid tanah ini memungkinkan kation-kation logam berat terikat kuat sehingga menurunkan kelarutannya di dalam tanah dan menurunkan ketersediaannya pada tanaman (**Gambar 5.2**). Karena kehadiran ligan, sebagian kation juga membentuk kompleks dan mengendap. Misalnya kehadiran HCO_3^- dalam jumlah tinggi pada tanah alkalin mengakibatkan ion-ion Cu^{2+} membentuk kompleks dan sebagian mengendap dalam bentuk $\text{CuCO}_{3(s)}$ sehingga mengurangi ketersediaannya pada tanaman. Selain ketersediaannya menurun oleh proses pengendapan, Cu juga diikat lebih kuat oleh koloid tanah.

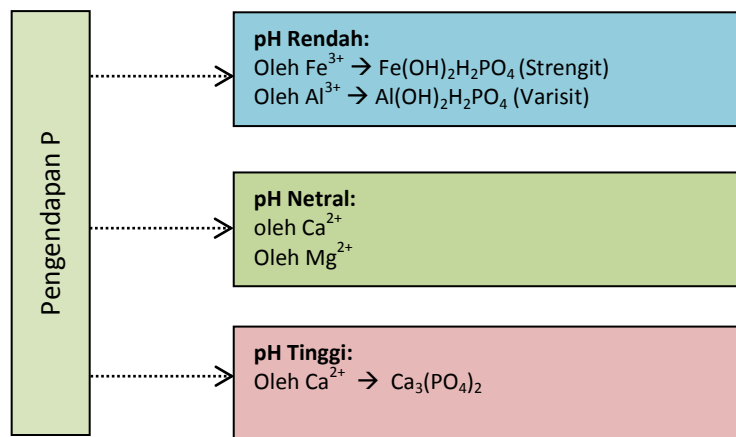
Ketersediaan unsur-unsur basa seperti Ca, Mg, dan K pada pH tinggi meningkat. Ketersediaan P menurun karena diikat oleh ion-ion Ca^{2+} sebagai berikut:



Ion Al^{3+} yang pada pH rendah berikatan dengan ortofosfat membentuk Varisit, pada pH tinggi mengendap dalam bentuk hidroksida ($\text{Al}(\text{OH})_{3(s)}$), sehingga bahaya keracunan Al pada pH tinggi ternetralisasi (**Gambar 5.16**). Demikian juga Fe^{3+} yang pada pH rendah mengikat P dalam bentuk endapan Strengit, pada pH tinggi ternetralisasi dan membebaskan ion fosfat. Namun pada pH tinggi, ion fosfat diikat oleh ion Ca^{2+} membentuk endapan Kalsium Fosfat (**Reaksi 5.18**).



Gambar 5.16. Pengaruh penerapan pupuk P terhadap pH tanah (Diadaptasi dari Salam, 1997b).



Gambar 5.17. Pengendapan fosfor di dalam tanah.

Abdul Kadir Salam – 2020

Tanah yang terlalu alkali dengan pH terlalu tinggi perlu dikelola dengan menurunkan pH tanah sehingga pH tanah dapat diatur pada pH yang lebih ideal, misalnya pH antara 6-7. Terdapat beberapa bahan pengasam yang sering digunakan, salah satunya adalah penggunaan belerang (S). Serbuk belerang di dalam tanah akan mengalami oksidasi dan menghasilkan asam yang dapat menurunkan pH tanah.

Berbeda dengan kapur, S relatif mahal. Akibatnya, usaha untuk menurunkan pH tanah dengan bahan ini sangat mahal. Cara yang terbaik adalah menerapkan S dengan perlakuan lokal hanya pada tempat terbatas. Belerang akan mengasamkan tanah dan meningkatkan ketersediaan unsur hara dalam radius kecil dari tanaman. Dengan cara demikian, S hanya diperlukan sedikit saja.

Pengasaman tidak hanya dilakukan pada tanah alkali, tetapi juga pada tanah asam, misalnya di perkebunan komersial *Great Giant Pineapple* di Terbanggi Besar Lampung. Penurunan pH tanah sangat biasa dilakukan untuk mengelola penyakit yang dapat menyerang tanaman nenas. Proses pengasaman yang berjalan bertahun-tahun mengakibatkan penurunan pH. Semakin lama tanah digunakan untuk pertanaman nenas, semakin rendah pH yang terukur.

Sebagian tanah alkalin adalah tanah salin dan tanah sodik. Dalam sebaran terbatas, kedua jenis tanah ini merupakan masalah pertanian termasuk di Indonesia. **Tanah salin** (*White Alkali*) adalah tanah dengan garam terlarut dalam jumlah yang berpengaruh buruk terhadap tanaman. Selain dicirikan oleh pH yang cukup tinggi, **Tanah Sodik** (*Black Alkali*) juga dicirikan oleh kandungan Na yang cukup tinggi. Kehadiran Na menyebabkan agregasi partikel-partikel tanah tidak terjadi. Akibatnya partikel-partikel tanah tercerai berai (**Dispersi**) dan mengganggu pertumbuhan dan produksi tanaman.

Tanah salin dapat berkembang bila laju evaporasi lebih tinggi daripada curah hujan, sehingga merangsang penguapan air tanah. Penguapan air tanah akan meninggalkan garam terlarut di lapisan atas tanah. Namun demikian, tanah ini juga dapat berkembang oleh pengaruh air irigasi yang mengandung garam, termasuk Na. Mengatasi tanah salin dapat dilakukan dengan pencucian tanah dengan air yang berkualitas baik. Air akan membawa garam terlarut ke lapisan bawah di bawah daerah perakaran tanaman.

Salah satu cara untuk mengatasi masalah tanah sodik adalah dengan menurunkan kandungan Na di dalam tanah dan meningkatkan kandungan Ca, sehingga agregasi partikel-partikel tanah lebih baik. Usaha ini dapat dilakukan dengan penambahan senyawa berkalsium, misalnya gipsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Kalsium akan menggantikan Na, yang kemudian bersenyawa dengan SO_4^{2-} . Pencucian dengan air berkualitas baik kemudian akan mencuci Na_2SO_4 keluar dari daerah

Abdul Kadir Salam – 2020

perakaran tanaman. Kalsium akhirnya akan mengakibatkan agregasi partikel tanah dan memperbaiki sifat fisika tanah.

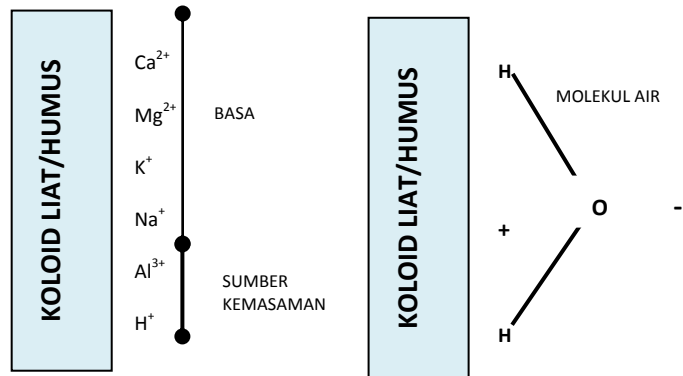
5.4 Peranan dan Asal Usul Muatan Negatif Tanah

Koloid tanah yang terdiri dari mineral liat dan humus menunjukkan reaktivitas yang tinggi, disebabkan kedua bahan koloid ini memiliki luas permukaan dan muatan negatif yang sangat tinggi (**Gambar 5.18**). Kehadiran muatan negatif ini menyebabkan terikatnya berbagai kation dan memungkinkan terjadinya pertukaran kation antara kation yang terikat pada koloid tanah dengan kation yang terlarut di dalam air tanah, sehingga perbatasan antara koloid tanah dengan air tanah yang menyelaputinya menjadi wilayah yang 'sangat sibuk' oleh keluar masuknya kation dari dan ke air tanah. Semakin banyak muatan negatif, semakin banyak kation yang keluar-masuk perbatasan.

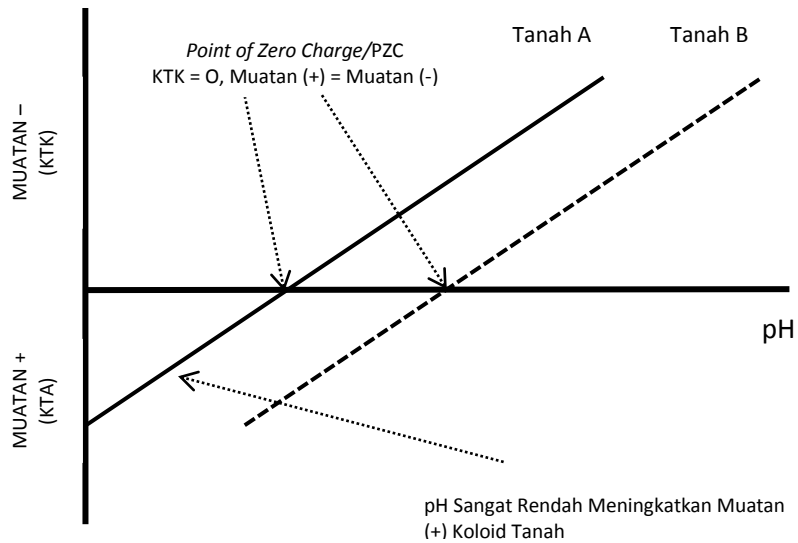
Seperti diungkapkan sebelumnya, muatan negatif koloid tanah dapat berasal dari empat sumber. Yang pertama adalah dari dehidrogenasi gugus OH pada patahan mineral liat silikat tipe 1:1, yang banyak terdapat di wilayah tropika. Yang kedua adalah yang berasal dari proses substitusi isomorfik unsur inti pada bangunan dasar mineral liat silikat berupa Si-Tetrahedral dan Al-Oktahedral, khususnya pada mineral liat silikat tipe 2:1 (misalnya Montmorilonit), ketika Al^{3+} digantikan oleh Fe^{2+} dan/atau Al^{3+} digantikan oleh Mg^{2+} , atau Si^{4+} digantikan oleh Al^{3+} , sehingga meninggalkan muatan negatif. Sumber kedua ini lebih banyak terdapat di tanah yang lebih muda di wilayah sub-tropika. Yang ketiga adalah yang berasal dari dehidrogenisasi gugus fungsional pada bahan organik atau humus. Proses ini meninggalkan muatan negatif pada permukaan koloid organik. Gugus fungsional penghasil muatan negatif di antaranya adalah gugus karboksilat ($R-COOH \rightarrow R-COO^-$) dan gugus fenolik ($C_6H_5-OH \rightarrow C_6H_5-O^-$). Yang keempat adalah yang berasal dari oksida, hidroksida, dan hidroksioksida, yang merupakan mineral liat nir-silikat. Mineral ini terdapat banyak di tanah-tanah tua di wilayah tropika.

Muatan negatif koloid tanah di atas, kecuali yang berasal dari substitusi isomorfik, sangat dipengaruhi oleh pH tanah. Umumnya, muatan negatif koloid tanah meningkat dengan meningkatnya pH tanah. Pada pH rendah, saat ion H^+ tanah berada dalam konsentrasi tinggi, gugus-gugus fungsional 'dikerumuni' oleh ion H^+ , sehingga jumlah muatan negatif tanah menurun. Dalam keadaan tertentu, muatan netto tanah dapat positif. Dengan meningkatnya pH tanah, konsentrasi ion H^+ menurun karena ternetralisasi oleh kehadiran ion OH^- sehingga muatan negatif

tanah meningkat (Gambar 5.19 dan Gambar 5.20). Sebaliknya, muatan negatif yang berasal dari substitusi isomorfik tidak terpengaruh oleh naik turunnya nilai pH.

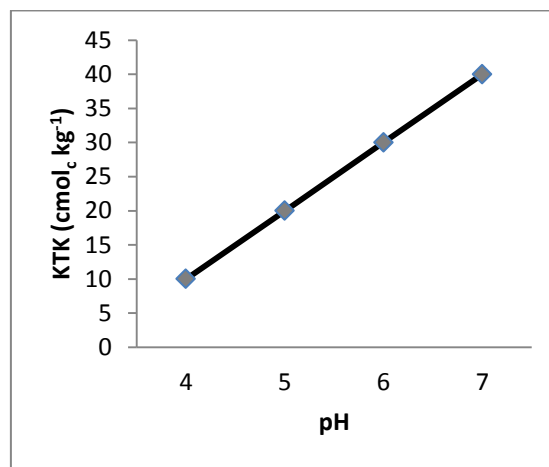


Gambar 5.18. Muatan negatif koloid tanah dan pengikatan kation dan air.



Gambar 5.19. Perubahan muatan negatif tanah akibat perubahan pH tanah.

Dengan demikian terlihat jelas bahwa penurunan pH tanah akan mengakibatkan penurunan muatan negatif tanah. Pada suatu nilai tertentu, muatan netto koloid tanah akan bernilai nol. Nilai pH ini disebut **Point of Zero Charge (PZC)**. Di bawah PZC, muatan netto tanah positif, sehingga tanah tidak lagi mengikat kation tetapi mengikat anion. Kondisi ini juga memungkinkan terjadinya pertukaran anion antara anion yang terikat oleh koloid tanah dan yang terlarut di dalam air tanah. Proses ini disebut **Pertukaran Anion**. Di dalam tanah dengan koloid bermuatan positif seperti ini, kation akan ditolak oleh koloid tanah karena memiliki muatan yang berlawanan. PZC beberapa jenis mineral tanah disajikan pada **Tabel 5.10**.



Gambar 5.20. Hubungan antara KTK dan pH tanah.

Selain oleh pH, KTK juga dilaporkan dipengaruhi oleh perlakuan pupuk P. Beberapa peneliti melaporkan bahwa fosfat dapat bereaksi dengan koloid tanah dan meningkatkan daya jerap tanah terhadap kation, misalnya kation logam berat (Saeed dan Fox, 1979; Xie dan McKenzie, 1990). Xie dan McKenzie (1990) melaporkan bahwa penambahan 1 mmol pirofosfat meningkatkan KTK tanah sebesar 0.52 sampai dengan 0.89 mmol_c kg⁻¹. Proses ini berkaitan dengan

peningkatan adsorpsi Zn setara dengan 0.3 sampai dengan 12% dari peningkatan KTK yang disebabkan oleh adsorpsi pirofosfat tersebut. Akibatnya, P sulit diserap oleh tanaman dan dapat mengakibatkan gejala defisiensi pada tanaman (Friesen dkk., 1980; Norvell dkk., 1987). Proses ini dapat mengakibatkan penurunan ketersediaan unsur hara mikro kelompok logam berat (Brown dkk.,1970; Saeed dan Fox, 1979; Kuo dan McNeal,1984; Xie dan McKenzie, 1990). Penurunan ini juga dapat diakibatkan oleh meningkatnya pH dengan penambahan pupuk P dan meningkatnya KTK tanah akibat meningkatnya pH tanah.

Tabel 5.10. Point of Zero Charge beberapa jenis mineral.

Mineral	PZC
α -Al ₂ O ₃	9.1
α -Al(OH) ₃	5.0
γ -AlOOH	8.2
CuO	9.5
Fe ₃ O ₄	6.5
α -FeOOH	7.8
γ -Fe ₂ O ₃	6.7
Fe(OH) ₃ Amorfus	8.5
MgO	12.4
δ -MnO ₂	2.8
β -MnO ₂	7.2
SiO ₂	2.0
ZrSiO ₄	5.0
Feldspar	2 – 2.4
Kaolinit	4.6
Montmorilonit	2.5
Albit	2.0
Crisotil	< 12

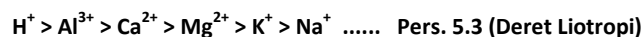
5.5 Pertukaran Kation

Seperti diungkapkan di atas, kehadiran muatan negatif memiliki konsekuensi terjerapnya kation karena memiliki muatan yang berlawanan. Karena bersifat

elektrostatik, setiap kation akan terjerap di permukaan koloid negatif dengan cara yang sama. Namun demikian, penyerapan ini bersifat sementara. Kation yang terjerap pada saatnya dapat dibebaskan dari koloid tanah dan tempatnya semula akan digantikan oleh kation lain. Dengan berjalannya waktu, kation yang telah dibebaskan dapat juga terjerap kembali. Dengan demikian, kation yang terjerap di permukaan koloid tanah bersifat dapat dipertukarkan. Oleh karena itu, kation yang terjerap disebut **Kation Dapat Dipertukarkan** (Kation-dd) (Thomas, 1982). Bila kation tersebut adalah Ca^{2+} , maka disebut Ca-dd, bila Mg^{2+} maka disebut Mg-dd, bila Cu^{2+} yang dijerap maka disebut Cu-dd, dan seterusnya. Proses pertukaran kation diperlihatkan pada **Gambar 5.21**.

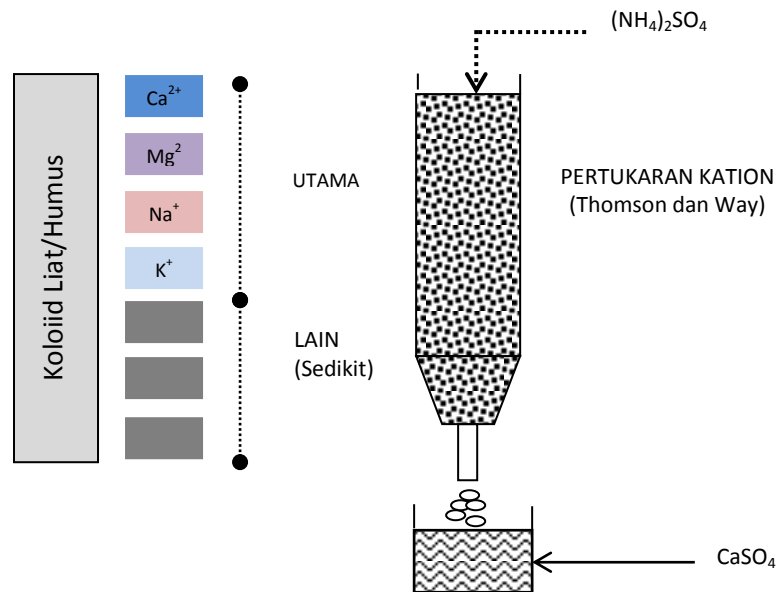
Proses pertukaran kation pertama kali dilaporkan oleh Thomson dan Way dalam sebuah percobaan dengan menggunakan kolom tanah. Ke dalam kolom tanah dimasukkan larutan $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$. Setelah proses berjalan, cairan yang keluar di ujung bawah kolom dianalisis, dan yang ditemukan adalah CaSO_4 . Dari percobaan tersebut disimpulkan bahwa NH_4^+ yang dimasukkan ke dalam kolom tanah bertukar dengan ion Ca-dd di dalam tanah, sehingga ion Ca^{2+} meninggalkan posisinya yang digantikan oleh ion NH_4^+ , sehingga yang keluar di ujung kolom berganti menjadi CaSO_4 . NH_4^+ sebenarnya memiliki preferensi yang lebih rendah, namun karena konsentrasi yang dimasukkan ke dalam kolom tanah relatif tinggi akibatnya ion Ca^{2+} terusir dari posisinya. Secara matematika, proses pertukaran kation dapat diperlihatkan dengan **Gambar 5.22**, sedangkan pertukaran anion pada **Gambar 5.23**.

Kation dijerap oleh koloid tanah dengan derajat kekuatan yang berbeda. Beberapa jenis kation diikat lebih kuat dibandingkan dengan kation lain. Kecenderungan ini disebut **Selektivitas Kation**. Selektivitas kation untuk beberapa jenis kation dapat diperlihatkan dalam sebuah deret, yang disebut **Deret Liotropi (Persamaan 5.3)**. Ion H^+ diikat oleh koloid tanah lebih kuat dibandingkan ion Al^{3+} ; ion Ca^{2+} diikat lebih kuat daripada ion Mg^{2+} ; ion Mg^{2+} diikat lebih kuat daripada ion K^+ , dan seterusnya. Selektivitas koloid tanah terhadap kation sudah tentu sangat berpengaruh terhadap proses pertukaran kation. Misalnya, ion Ca^{2+} akan mendominasi koloid tanah dibandingkan dengan ion K^+ .



Selektivitas kation dipengaruhi oleh banyak faktor. Faktor yang pertama adalah kapasitas jerap koloid tanah, yang menunjukkan jumlah muatan negatif dan diekspresikan sebagai jumlah kation yang dijerap per satuan massa tanah. Kapasitas tanah dalam menjerap kation disebut **Kapasitas Tukar Kation**. Semakin

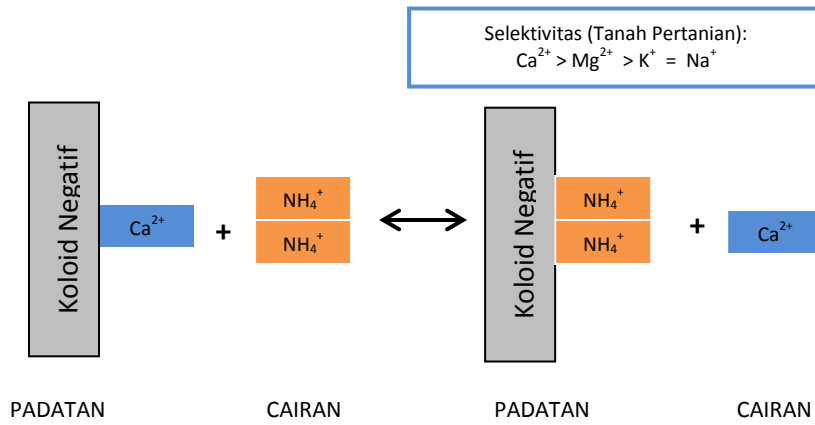
tinggi nilai KTK tanah semakin kuat juga ikatan antara koloid tanah dengan sebuah kation. Faktor yang kedua adalah muatan kation. Secara umum, derajat kekuatan ikatan antara koloid tanah lebih tinggi bila muatan kation yang terikat pada koloid tanah lebih tinggi. Kekuatan ikatan tentunya akan semakin kuat bila kation dengan valensi tinggi terikat pada koloid tanah dengan KTK tinggi.



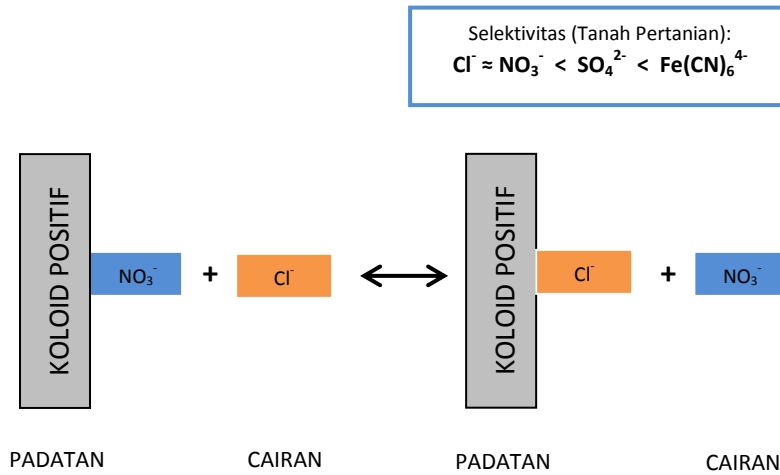
Gambar 5.21. Pertukaran kation di dalam sistem tanah.

Selain itu, kekuatan ikatan antara koloid tanah dengan sebuah kation juga tergantung pada jarak antara koloid tanah dengan inti atom ion tersebut. Semakin pendek jaraknya, akan semakin kuat juga ikatannya. Misalnya, ion Ca^{2+} dan ion Mg^{2+} memiliki muatan yang sama, namun keterikatannya pada koloid tanah lebih besar Ca^{2+} dibandingkan dengan Mg^{2+} . Perbedaan ini disebabkan radius terhidrasi ion Ca^{2+} lebih kecil dibandingkan dengan ion Mg^{2+} . Demikian juga antara ion K^+ dan Na^+ . Ion K^+ lebih kuat diikat karena ion K^+ memiliki radius terhidrasi lebih kecil.

Abdul Kadir Salam – 2020



Gambar 5.22. Pertukaran (adsorpsi – desorpsi) kation di dalam sistem tanah.

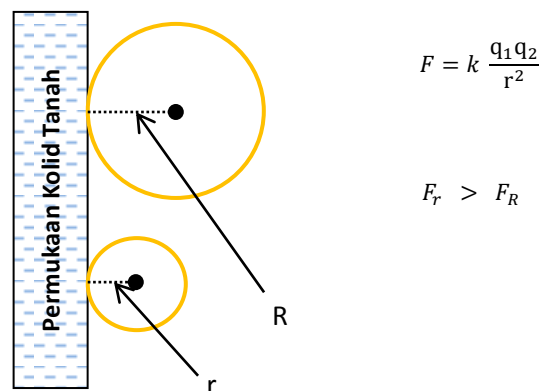


Gambar 5.23. Pertukaran (adsorpsi – desorpsi) anion di dalam sistem tanah.

Fenomena selektivitas pengikatan kation demikian dapat digambarkan secara matematika dalam bentuk Hukum Coloumb sebagai berikut (**Pers. 5.4**):

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \dots\dots \text{Pers. 5.4}$$

Notasi F menunjukkan gaya ikatan antara koloid tanah dengan sebuah kation. Notasi q_1 menunjukkan muatan negatif koloid tanah, semakin tinggi akan semakin besar daya ikatnya, sehingga menghasilkan nilai F lebih tinggi. Misalnya, tanah organik memiliki daya ikat lebih tinggi daripada tanah liat silikat bertipe 1:1, karena KTK tanah organik lebih tinggi. Tanah organik memiliki KTK sekitar 200 cmol_c per kg, sedangkan tanah dengan liat silikat tipe 1:1 memiliki KTK 10 cmol_c per kg. Notasi q_2 menunjukkan muatan positif kation, semakin tinggi akan semakin kuat diikat oleh koloid tanah karena menghasilkan nilai F lebih besar. Misalnya, ion Al^{3+} diikat lebih kuat daripada ion K^+ . Notasi r menunjukkan jarak antara koloid tanah dengan kation atau radius kation. Daya ikat koloid tanah berbanding terbalik dengan radius kation, sehingga semakin besar radius kation menyebabkan nilai F lebih rendah (**Gambar 5.24**). Oleh karena itu, ion K^+ lebih kuat diikat daripada ion Na^+ karena radius terhidrasi ion K^+ lebih kecil.



Gambar 5.24. Pengaruh radius ion terhadap kekuatan ikatan.

5.6 Daya Jerap Tanah dan Kapasitas Tukar Kation

Daya jerap tanah terhadap kation direpresentasikan dengan parameter Kapasitas Tukar Kation (KTK). Secara teori, KTK menunjukkan jumlah seluruh muatan negatif yang terdapat dalam satu kilogram massa tanah (Rhoades dkk., 1982). Secara praktis, KTK dihitung sebagai penjumlahan dari seluruh kation yang dapat dipertukarkan. Kation dapat dipertukarkan dapat diperoleh dengan mengekstrak seluruh kation yang dapat dipertukarkan dengan menggunakan sebuah larutan pengekstrak. Larutan pengekstrak yang biasa digunakan adalah 1 N NH_4OAc pH 7. Selain itu juga dapat digunakan 1 N NH_4NO_3 , 1 M BaCl_2 , dan seterusnya. Kation pengekstrak berupa ion NH_4^+ atau ion Ba^{2+} yang berlebih akan mengeluarkan seluruh kation dapat dipertukarkan melalui proses pertukaran kation. Kation-kation dapat dipertukarkan dalam ekstrak kemudian dianalisis dengan menggunakan *Flame Atomic Absorption Spectrophotometer (Flame AAS)*.

Setelah konsentrasi setiap kation diperoleh, KTK dapat dihitung dengan menjumlahkan seluruh kation dapat dipertukarkan baik kation utama, yaitu Ca-dd, Mg-dd, K-dd, Na-dd, Al-dd, dan H-dd, maupun kation nir-utama seperti Fe-dd, Cu-dd, Mn-dd, Zn-dd, dan kation-kation lain yang terukur. Namun demikian, secara praktis yang dimasukkan ke dalam perhitungan adalah hanya kation-kation utama saja sehingga menghasilkan KTK efektif dengan formula sebagai berikut:

$$\text{KTK} = \text{Ca-dd} + \text{Mg-dd} + \text{K-dd} + \text{Na-dd} + \text{Al-dd} + \text{H-dd} \dots\dots \text{Pers. 5.5}$$

KTK tanah beragam antarjenis tanah, dipengaruhi oleh berbagai faktor. Jenis padatan adalah faktor paling utama yang memengaruhi KTK. KTK tanah umumnya lebih tinggi bila tanah mengandung bahan organik yang lebih tinggi. Demikian pula halnya bila tanah memiliki mineral liat silikat tipe 2:1 seperti Montmorilonit. Sebaliknya, tanah yang mengandung lebih banyak mineral liat silikat tipe 1:1 atau Kaolinit atau oksida/hidroksida/hidroksioksida (sesquioksida) memiliki nilai KTK yang relatif lebih rendah. Dengan demikian, bila kita ingin meningkatkan KTK tanah dapat dilakukan dengan pencampuran bahan penyusun utama tanah. KTK tanah dapat ditingkatkan dengan penambahan bahan organik, yang memiliki KTK tinggi, atau dengan menambahkan bahan-bahan lain yang memiliki muatan negatif dalam jumlah tinggi.

Muatan negatif tanah terdiri dari dua jenis. Sebagian merupakan **Muatan Tidak Tergantung pH**, sehingga naik turunnya pH tanah tidak memengaruhi nilai KTK. Muatan negatif ini bersumber dari substitusi isomorfik dan terdapat pada tanah dengan mineral liat silikat tipe 2:1. Sebagian muatan negatif adalah **Muatan**

Tergantung pH, yang berubah sesuai dengan perubahan nilai pH. Pada pH rendah, muatan tergantung pH umumnya rendah dan pada pH tinggi muatannya tinggi (Anda, 1999). Muatan ini berasal dari dehidrogenasi pada gugus fungsional bahan mineral dan bahan organik (humus) tanah. Dengan demikian, KTK tanah akan meningkat dengan meningkatnya pH tanah, khususnya bila tanah lebih banyak mengandung bahan organik dan mineral liat silikat tipe 1:1. Anda (1999) melaporkan bahwa muatan positif mulai muncul pada pH <3.5 untuk dua buah tanah Ultisols dan sebuah Oxisol dan pada pH < pH 5 untuk sebuah Oxisol lain yang digunakan dalam penelitiannya

5.7 Kejenuhan Basa dan Kejenuhan Aluminium

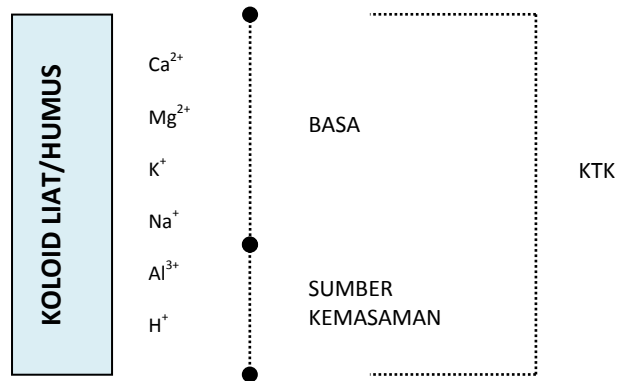
Kation utama tanah yang terjerap di permukaan koloid tanah terbagi menjadi dua kelompok, yaitu **Kation Basa**, yang mencakup Ca-dd, Mg-dd, K-dd, dan Na-dd, dan **Kation Asam**, yang mencakup Al-dd dan H-dd (**Gambar 5.25**). Kation basa menyebabkan tanah bereaksi basa dan memiliki pH lebih tinggi, sedangkan kation asam menyebabkan tanah bersifat masam karena meningkatkan konsentrasi ion H⁺. Ion Al³⁺ merupakan kation asam karena merupakan sumber kemasaman. Bila ion ini terhidrolisis, ion ini akan menghasilkan ion H⁺ (**Reaksi 5.16**).

Untuk menggambarkan kuantitas kedua kelompok kation tersebut, maka digunakan dua buah parameter, yaitu Kejenuhan Basa (KB) untuk menunjukkan kuantitas kation-kation basa yang terikat pada koloid tanah, dan Kejenuhan Aluminium (KAl) untuk menunjukkan kuantitas sumber kemasaman potensial. KB dapat dihitung dengan formula sebagai berikut:

$$KB = \frac{Ca-dd+Mg-dd+Na-dd+K-dd}{KTK} \times 100\% \quad \text{..... Pers. 5.6}$$

Sedangkan KAl dapat dihitung dengan formula sebagai berikut:

$$KAl = \frac{Al-dd}{KTK} \times 100\% \quad \text{..... Pers. 5.7}$$



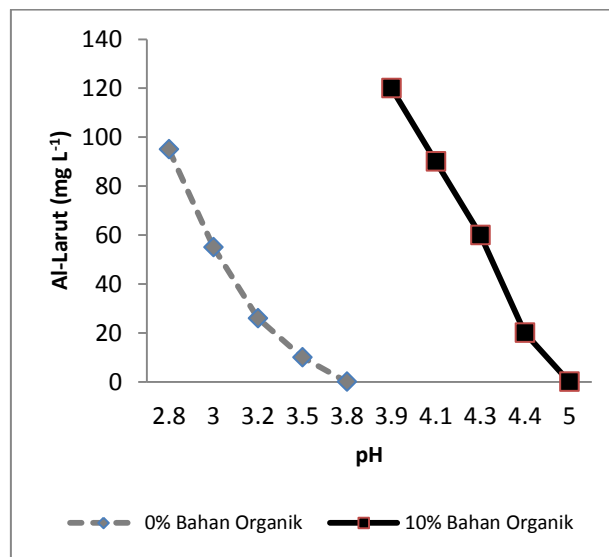
Gambar 5.25. Muatan negatif koloid tanah dan pengikatan kation.

5.8 Hubungan antara Kapasitas Tukar Kation, Kejenuhan Basa, Kejenuhan Aluminium, dan Reaksi Tanah

Reaksi tanah (pH) berkorelasi dengan KTK maupun KB. Secara umum, KTK tanah meningkat dengan meningkatnya pH tanah (Salam, 1999; 2001; Adams dkk., 2004; Bang and Hesterberg, 2004; Quaghebeur dkk., 2005; He dkk., 2006; Brown dkk., 2009) (**Gambar 5.20**). Seperti telah diungkapkan sebelumnya, hal ini terkait dengan dehidrogenasi gugus-gugus fungsional bahan mineral dan nir-mineral (organik) tanah. Perubahan ini tentunya terkait juga dengan jenis tanah, karena setiap jenis tanah memiliki kandungan bahan mineral dan bahan organik yang berbeda dengan komposisi yang berbeda juga.

Menurut catatan, KB tanah juga meningkat dengan meningkatnya KTK tanah. Muatan negatif yang berkembang dengan meningkatnya pH tanah diisi oleh lebih banyak kation-kation basa. Dengan demikian, terdapat hubungan positif antara pH,

KTK, dan KB tanah. Beberapa laporan juga menunjukkan bahwa Kejenuhan Aluminium atau Aluminium larut berkaitan erat dengan pH tanah (Novpriansyah, 1999). Secara umum hubungan tersebut digambarkan pada **Gambar 5.26** dan **Gambar 5.27**, masing-masing untuk Al-larut dan Al-dd (Hargrove dan Thomas, 1981). Baik Al-Larut maupun Al-dd turun dengan meningkatnya pH. Kehadiran bahan organik di dalam tanah juga menurunkan Al-larut dan Al-dd. Tang dkk. (2006) melaporkan bahwa penerapan kotoran hewan dapat menurunkan toksisitas Al dalam tanah asam.



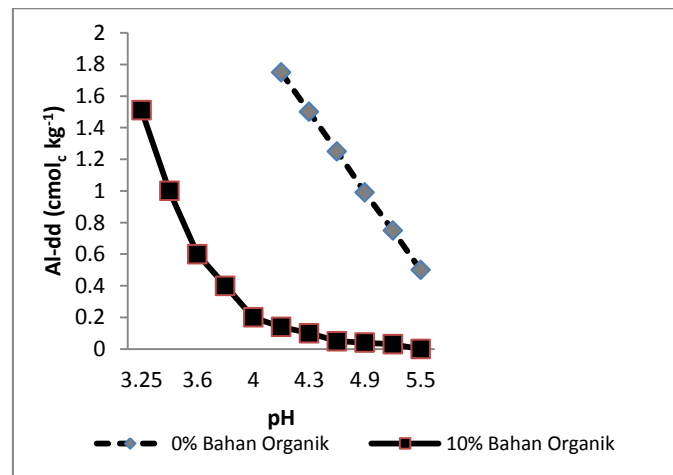
Gambar 5.26. Hubungan antara Al-Larut dan pH tanah (Hargrove dan Thomas, 1981).

5.9 Pertukaran Anion

Telah diungkapkan sebelumnya bahwa penurunan pH tanah di bawah PZC akan menyebabkan koloid tanah berubah dari bermuatan negatif menjadi bermuatan positif (**Gambar 5.19**). Hal ini diakibatkan oleh banyaknya ion H^+ pada pH rendah

Abdul Kadir Salam – 2020

yang ‘mengerumuni’ koloid tanah sehingga muatannya berubah dari negatif menjadi positif. Muatan positif ini terbentuk hanya pada gugus fungsional mineral liat silikat tipe 1:1, mineral liat nir-silikat, dan bahan organik (humus). Semakin banyak gugus fungsional yang terdapat di dalam koloid tanah maka semakin tinggi pula muatan positif yang terbentuk.

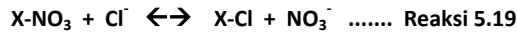


Gambar 5.27. Hubungan antara Al-dd dan pH tanah (Hargrove dan Thomas, 1981).

Terbentuknya muatan positif membawa konsekuensi berupa terikatnya ion-ion yang berlawanan muatan, yaitu anion. Anion terikat secara elektrostatis pada muatan positif pada koloid tanah. Sebagian anion diikat secara kuat, sebagian lain terikat secara lemah. Karena pengikatan anion bersifat sementara, anion juga dapat dibebaskan dan diikat kembali tergantung selektivitas dan faktor lingkungan yang memengaruhinya. Oleh karena itu, anion yang diikat disebut anion dapat dipertukarkan (Anion-dd). Berbagai anion dapat diikat dan dipertukarkan pada permukaan koloid positif tanah, misalnya SO₄^{-dd}, Cl^{-dd}, NO₃^{-dd}, dan seterusnya.

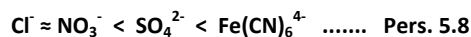
Selain secara elektrostatik, ion fosfat (H_2PO_4^-) juga tertarik pada permukaan koloid bermuatan positif secara lebih kuat pada permukaan koloid yang memiliki Fe, Al, atau Ca dengan mekanisme **Penjerapan Spesifik** (*Specific Adsorption*), yang dapat terjadi pada permukaan koloid positif dan/atau negatif.

Anion-dd dapat mengalami pertukaran dengan anion yang terdapat di dalam air tanah yang berbatasan dengan koloid tanah. Proses pertukaran ini disebut **Pertukaran Anion**. Pertukaran Anion secara matematika dapat digambarkan sebagai berikut:



Dalam reaksi di atas, sebuah ion NO_3^- yang sebelumnya berada di permukaan koloid tanah ditukar dengan sebuah ion Cl^- yang sebelumnya berada di dalam air tanah. Setelah proses pertukaran anion, NO_3^- berada di dalam air tanah dan Cl^- berada terikat pada koloid tanah sebagai Cl-dd.

Seperti halnya pertukaran kation, proses pertukaran anion juga diatur oleh Hukum Coulomb. Kekuatan ikatan anion pada koloid tanah tergantung pada muatan koloid tanah (q_1), muatan anion (q_2), dan jarak antara muatan atau radius efektif anion. Kekuatan ikatan sebuah anion pada koloid tanah lebih tinggi bila muatan koloid tanah tinggi, muatan anion lebih tinggi, dan radius efektif anion lebih pendek. Selain itu selektivitas anion juga tergantung pada massa anion atau konsentrasi anion. Semakin tinggi konsentrasi anion akan semakin kuat diikat oleh koloid tanah. Preferensi koloid tanah terhadap anion adalah sebagai berikut (Bohn dkk., 1985):



Pertukaran anion bermanfaat dalam pengelolaan anion, terutama untuk anion yang terlalu banyak terdapat di dalam lingkungan akibat penggunaan berlebihan. Misalnya, anion NO_3^- yang terdapat banyak di dalam tanah sebagai akibat dari pemupukan urea berlebihan sehingga mengakibatkan tingginya konsentrasi anion NO_3^- yang akhirnya dapat mencemari Air Bawah Tanah dan sistem perairan lain seperti sungai dan laut. Ion ini akan diikat oleh koloid positif tanah sehingga tidak mudah bergerak mencapai Air Bawah Tanah. Namun demikian, rendahnya pH saat muatan positif mendominasi sangat tidak menguntungkan dari segi pertanian. Dalam kondisi asam, masalah yang ditimbulkan oleh Al dan Mn cukup besar. Selain bersifat toksik terhadap tanaman, unsur-unsur ini juga meningkatkan fiksasi P oleh tanah. Tanah yang memiliki muatan positif juga umumnya telah tua, sehingga

unsur hara yang disumbangkan melalui proses pelapukan mineral juga sangat rendah. [~]

Daftar Pertanyaan Utama

1. Apakah komposisi padatan tanah dapat berubah dengan waktu? Jelaskan mengapa!
2. Jelaskan bagaimana muatan negatif tanah berkembang! Jelaskan perbedaan yang terjadi pada mineral liat, hidroksioksida, dan humus tanah!
3. Apa yang disebut dengan substitusi isomorfik? Mengapa proses ini sangat penting?
4. Gambarkan dua bangunan dasar mineral liat silikat dan penyusunannya dalam Lembaran Silika dan Lembaran Alumina!
5. Apa yang disebut Mineral Liat Tipe 1:1 dan Tipe 2:1? Sebutkan contohnya!
6. Gambarkan bagaimana ikatan antara lapisan Lembaran Silika dan Lembaran Alumina dalam mineral Liat Tipe 1:1 dan Tipe 2:1!
7. Apakah akibat dari kehadiran ikatan H di dalam mineral liat silikat? Jelaskan!
8. Jelaskan perbedaan struktur dan sifat Montmorilonit dan Mika!
9. Apa yang disebut pH tanah? Bagaimana cara menghitung dan mengukurnya?
10. Jelaskan bagaimana peranan pH tanah dalam pengelolaan tanah untuk pertanian dan lingkungan!
11. Bagaimana hubungan antara kelarutan logam berat dengan pH tanah? Jelaskan!
12. Bagaimana hubungan antara pelapukan tanah dengan pH tanah? Jelaskan!
13. Bagaimana hubungan antara pembusukan bahan organik tanah oleh mikroorganisme tanah dengan aktivitas enzim dan pH tanah?
14. Sebut dan jelaskan beberapa faktor yang memengaruhi pH tanah!
15. Bagaimana hubungan antara ketersediaan unsur hara makro dan unsur hara mikro dengan pH tanah?
16. Bagaimana reaksi kimia yang terjadi pada Apatit di dalam tanah? Bagaimana pengaruh Apatit sebagai bahan kapur sehingga dapat meningkatkan pH tanah?
17. Jelaskan bagaimana pengapuran dengan CaCO_3 atau $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ dapat meningkatkan pH tanah!
18. Bedakan pengertian dan sifat-sifat tanah asam dan tanah alkalin!
19. Apakah perbedaan dan persamaan antara tanah alkalin, tanah salin, dan tanah sodik? Jelaskan!
20. Apakah yang terjadi pada P di dalam tanah asam dan tanah alkalin? Jelaskan!
21. Apakah yang disebut dengan Kapasitas Sangga Tanah? Bagaimana tanah bisa bekerja sebagai penyangga pH?
22. Apakah peranan muatan negatif koloid tanah? Dari mana asal usulnya? Jelaskan!

23. Bagaimana tanah yang bermuatan negatif bisa berkembang menjadi bermuatan positif? Apa akibatnya?
24. Bagaimana hubungan antara KTK dengan pH tanah? Jelaskan mengapa demikian!
25. Apakah yang disebut dengan *Point of Zero Charge*?
26. Apa yang disebut dengan Pertukaran Kation dan Pertukaran Anion?
27. Apa yang disebut Kapasitas Tukar Kation dan Kapasitas Tukar Anion?
28. Bagaimana cara menghitung KTK, Kejenuhan Basa, dan Kejenuhan Aluminium?
29. Mengapa H-dd dan Al-dd dijuluki sebagai sumber kemasaman potensial? Bagaimana keduanya dapat memengaruhi pH tanah?
30. Apa yang disebut dengan selektivitas kation? Apa hubungannya dengan Deret Liotropi?
31. Faktor apa saja yang memengaruhi selektivitas kation? Jelaskan dengan Hukum Coulomb!

“Apakah kamu tiada melihat, bahwasannya Allah menurunkan AIR dari langit, lalu jadilah BUMI itu HIJAU? Sesungguhnya Allah Maha Halus lagi Maha Mengetahui” (QS Al-Hajj [22]:63)

Bab VI:

BIOLOGI TANAH

- 6.1 Tanah Sebagai Tempat Hidup Mikroorganisme
 - 6.2 Peranan Bahan Organik dan Humus
 - 6.3 Daerah Perakaran dan Rizosfir
 - 6.4 Mikroorganisme Penghuni Tanah
 - 6.5 Makroorganisme Penghuni Tanah dan Akar Tanaman
 - 6.6 Daur Karbon, Nitrogen, dan Belerang
 - 6.7 Nitrifikasi dan Denitrifikasi
 - 6.8 Produksi Enzim Tanah dan Asam Organik
- Daftar Pertanyaan Utama*

6.1 Tanah Sebagai Tempat Hidup Mikroorganisme

Selain merupakan media reaksi kimia yang sangat kompleks, tanah juga merupakan sebuah sistem hidup, yang di dalamnya terdapat ‘masyarakat’ kehidupan. Makhluk hidup di dalam tanah bertumbuh dan berkembang di dalam pori tanah, yang di dalamnya juga terdapat berbagai fasilitas untuk keberlangsungan suatu kehidupan. Fasilitas tersebut adalah ruang, yaitu pori tanah, yang memungkinkan makhluk hidup dapat bertumbuh secara fisik. Selain

Abdul Kadir Salam – 2020

ruang, di dalam pori tanah terdapat juga media yang mengandung berbagai bahan yang diperlukan oleh makhluk hidup, yaitu air dan udara. Air, yang mengisi pori mikro dan pori meso tanah dan menyelaputi pinggiran pori makro, mengandung unsur hara yang bisa diserap oleh mikroorganisme untuk memenuhi keperluan hidupnya. Udara yang mengisi pori meso dan pori makro tanah memasok O_2 , yang diperlukan untuk respirasi bagi mikroorganisme dan akar tanaman dalam rangka memperoleh energi yang diperlukan untuk bertumbuh dan berkembang dan bagi akar tanaman juga untuk menyerap air dan unsur hara.

Sistem saluran pori (ruang pori yang saling berhubungan) juga mengakibatkan terhubungnya udara tanah dan udara atmosfer, sehingga penurunan O_2 di udara tanah setelah dikonsumsi 'penghuni tanah' dapat diimbangi dengan difusi O_2 dari atmosfer menuju udara tanah melalui saluran pori. Dengan demikian keberadaan O_2 di dalam sistem tanah akan terjamin untuk memenuhi keperluan makhluk hidup. Sebaliknya, CO_2 yang meningkat di dalam tanah akibat respirasi oleh mikroorganisme dan akar tanaman segera dikeluarkan ke udara atmosfer melalui saluran pori tanah. Demikian juga air yang berkurang di dalam tanah dapat dipasok ke dalam tanah dengan infiltrasi dan perkolasi menuju pori tanah, sehingga keberadaan air di dalam tanah terjamin untuk keperluan kehidupan tanah.

Keberadaan makhluk hidup di dalam sistem tanah dapat bersifat menguntungkan dan merugikan. Sebagian organisme dapat memperbaiki sifat tanah dengan membuat pori dan memperbaiki porositas tanah. Sebagian yang lain menjadi dekomposer bahan organik yang masuk ke dalam sistem tanah sehingga membantu siklus unsur hara seperti C, N, dan S di dalam sistem tanah-tanaman. Sebagian lagi, khususnya yang bersifat patogen, dapat sangat merugikan karena merupakan agen penyakit tanaman. Pengelolaan tanah untuk keperluan pertanian tidak dapat mengesampingkan pentingnya organisme tanah dan pengaruhnya terhadap kesuburan tanah, baik yang bersifat menguntungkan maupun yang bersifat merugikan.

Keberadaan mikroorganisme di dalam sistem tanah dapat diamati secara tidak langsung dengan menggunakan beberapa indikator. Di antara indikator yang penting adalah: (a) Evolusi CO_2 , yang merupakan hasil respirasi bahan organik oleh mikroorganisme tanah, (b) Aktivitas enzim tanah, yang diproduksi oleh mikroorganisme tanah. Kedua indikator ini dapat menunjukkan populasi dan aktivitas mikroorganisme tanah. Peningkatan evolusi CO_2 dan aktivitas enzim tanah menunjukkan meningkatnya populasi dan aktivitas mikroorganisme tanah. Sebagai contoh adalah meningkatnya produksi CO_2 akibat substitusi pupuk kimia dengan pupuk organik (**Tabel 6.1**).

6.2 Peranan Bahan Organik dan Humus

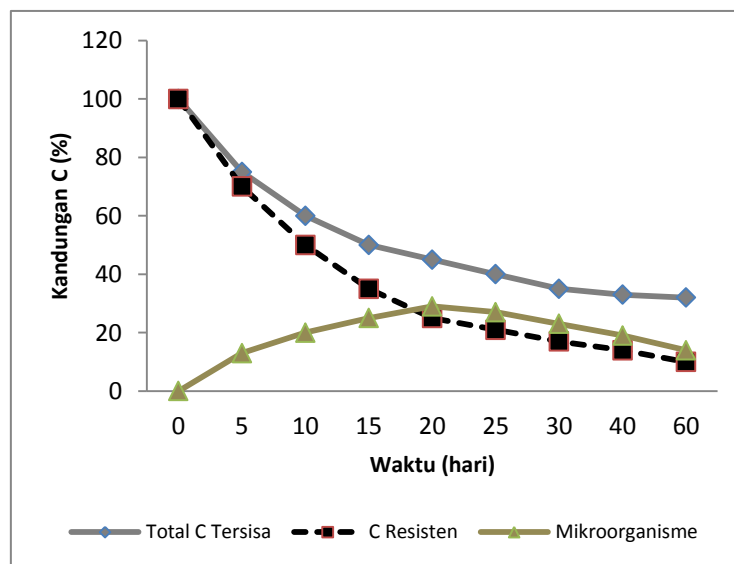
Kehidupan makhluk hidup di dalam sistem tanah tidak terlepas dari kehadiran bahan organik, yang merupakan sumber karbon atau energi bagi mikroorganisme dan makroorganisme tanah seperti cacing tanah dan makroorganisme lain. Beberapa laporan menunjukkan bahwa kehadiran bahan organik berkaitan langsung dengan meningkatnya populasi dan aktivitas mikroorganisme tanah (Yusnaini dkk., 2007). Telah diperlihatkan bahwa populasi dan aktivitas mikroorganisme tanah meningkat secara signifikan akibat substitusi pupuk kimia dengan pupuk organik, dan substitusi dengan kotoran ayam mengakibatkan populasi dan aktivitas mikroorganisme meningkat dengan lebih tajam (Yusnaini dkk., 2007). Hal ini ditunjukkan oleh evolusi CO₂ yang meningkat akibat dekomposisi bahan organik oleh mikroorganisme tanah. Produksi enzim tanah juga berbanding lurus dengan kandungan C Organik (Salam dkk., 1998d; 1999d; 1999e; Kotroczo dkk, 2014), yang menunjukkan bahwa produksi enzim terkait erat dengan kandungan bahan organik tanah. Perubahan kandungan C organik di dalam bahan organik dan mikroorganisme dalam suatu proses pembusukan diperlihatkan pada **Gambar 6.1**.

Tabel 6.1. Peningkatan evolusi CO₂ akibat substitusi pupuk kimia dengan pupuk organik*.

Perlakuan	mg CO ₂ -C kg ⁻¹
Kontrol	81
Pupuk Organik 0%	210
Pupuk Hijau 50%	141
Pupuk Hijau 75%	149
Pupuk Hijau 100%	154
Kotoran Ayam 50%	293
Kotoran Ayam 75%	268
Kotoran Ayam 100%	412

*Diadaptasi dari Yusnaini dkk. (2007)

Demikian juga kehidupan makroorganisme, yang meningkat dengan meningkatnya kandungan bahan organik tanah. Cacing tanah lebih banyak ditemukan di tanah lapisan atas, tempat kandungan bahan organik tanah lebih tinggi, dibandingkan dengan di lapisan bawah, yang memiliki kandungan bahan organik rendah. Populasi cacing tanah juga lebih banyak ditemukan di tanah hutan sekunder, semak dan alang-alang dibandingkan dengan lahan kopi yang diolah lebih intensif, yang memiliki C-Organik lebih rendah. Cacing tanah juga lebih banyak ditemukan pada musim hujan dibandingkan dengan musim kering. Pengamatan di Sumber Jaya Lampung Barat menunjukkan bahwa populasi cacing tanah rendah antara bulan Juli sampai dengan November dan mulai meningkat pada bulan Desember dan tertinggi pada bulan Februari sampai dengan April, pada saat musim hujan. Telah dilaporkan pula bahwa kadar air sangat berkaitan dengan populasi dan aktivitas organisme (Yusnaini dkk., 2002). Ini dapat difahami karena dekomposisi bahan organik sangat memerlukan air sebagai salah satu reaktan utama (**Reaksi 1.2 dan 2.2**).



Gambar 6.1. Perubahan kandungan C-Organik selama pembusukan sisa tanaman.
(Diambil dari Bohn dkk., 1985)

Cacing tanah merupakan salah satu makroorganisme yang paling aktif di dalam tanah. Yang dilakukan cacing tanah adalah mencerna tanah dan bahan organik dan mengeluarkan hasil cernaannya dalam bentuk kasting, yang umumnya sangat subur. Keberadaan cacing tanah tidak hanya menghasilkan kasting, tetapi juga mencampurkan partikel-partikel tanah antar-lapisan tanah dan mempersuburnya dengan kasting. Lubang-lubang yang dibuat oleh cacing tanah juga bermanfaat dalam mengelola tanah dengan baik, yaitu meningkatkan proses infiltrasi dan perkolasi air karena lubang-lubang cacing merupakan saluran yang berukuran cukup lebar dan panjang. Selain cacing tanah, terdapat juga makroorganisme lain yang dapat menciptakan pori tanah secara ekstensif, misalnya semut, tikus, dan marmut, yang juga berperan dalam pembusukan bahan organik. Pori yang diciptakan oleh binatang tanah ini berukuran lebih besar sehingga masukan air ke dalam tanah akan sangat lancar.

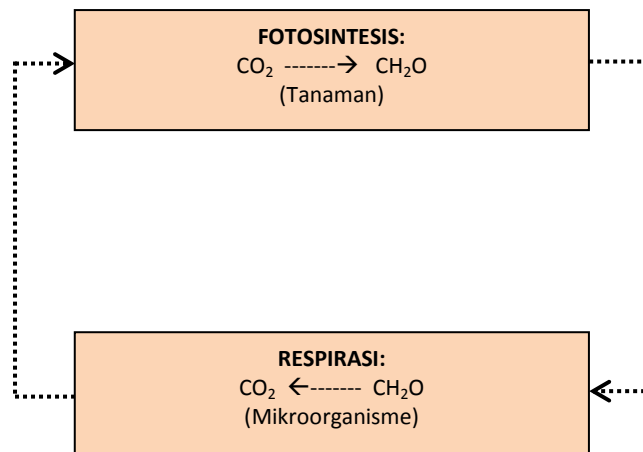
Bahan organik di dalam tanah berasal dari sisa-sisa tanaman, hewan, dan akar tanaman yang telah mati. Di dalam tanah bahan organik ini kemudian mengalami dekomposisi dan menyebabkan perubahan-perubahan sifat-sifat fisika, kimia, dan biokimia tanah. Proses dekomposisi bahan organik oleh mikroorganisme tanah melibatkan enzim, yang berfungsi sebagai katalisator. Enzim tanah ini diproduksi oleh mikroorganisme, cacing tanah, dan akar tanaman. Kehadiran enzim sangat mempercepat reaksi dekomposisi, sehingga bahan organik lebih cepat terlapuk dan menghasilkan berbagai unsur nir-organik yang dapat diserap oleh akar tanaman. Proses ini akan terus berlangsung sampai bahan organik tidak dapat lagi didekomposisi dan menghasilkan humus.

Selain terkait dengan kehadiran enzim tanah, yang berfungsi mempercepat perombakan bahan organik, kecepatan perombakan bahan organik juga tergantung pada nisbah C/N dari bahan organik yang didekomposisi. Nisbah C/N berpengaruh karena C organik diperlukan oleh mikroorganisme sebagai sumber energi (% Bahan Organik = $1.5-2.0 \times \%C$), sedangkan N diperlukan dalam pembentukan protein yang menyusun tubuh mikroorganisme. Dengan demikian, bahan organik yang memiliki C dan N tinggi atau Nilai C/N rendah akan lebih mudah terdekomposisi. Pada saat N tanah rendah atau Nisbah C/N tinggi, bahan organik sulit terdekomposisi karena N yang rendah tersebut dimanfaatkan untuk membentuk jaringan tubuh mikroorganisme. Oleh karena itu, bila N tanah rendah, proses dekomposisi bahan organik harus diinisiasi dengan penambahan pupuk urea, yang merupakan sumber N.

Proses dekomposisi bahan organik adalah salah satu proses yang melengkapi Daur C. Daur C dimulai dari proses fotosintesis, yang memanfaatkan CO_2 dari atmosfer dan mengombinasikannya dengan H_2O dari dalam tanah menghasilkan

gula sederhana dan selanjutnya membentuk jaringan tanaman (**Gambar 6.2**). Tanaman selanjutnya dikonsumsi oleh hewan dan manusia dan sisanya kembali ke dalam tanah. Sisa tanaman ini didekomposisi oleh mikroorganisme di permukaan dan/atau di dalam tanah dan sebagian lagi akan terinkorporasi di dalam tanah. Pada akhirnya seluruh bahan ber-C didekomposisi oleh mikroorganisme menjadi CO_2 yang diemisikan ke atmosfer, yang kemudian memasuki siklus baru bila CO_2 kembali dimanfaatkan oleh tanaman.

Dalam sebuah sistem yang tertutup, bahan organik selalu terdekomposisi dan digantikan oleh bahan organik baru. Namun demikian, dalam sistem terbuka pergantian bahan organik ini dapat terhenti karena sebagian atau seluruh sisa bahan organik tidak dikembalikan ke dalam sistem tanah tetapi digunakan untuk keperluan lain di luar sistem tanah. Fenomena ini akhirnya menurunkan cadangan C di dalam sistem tanah, yang dapat berakibat pada menurunnya populasi dan aktivitas mikroorganisme serta menurunnya tingkat kesuburan tanah.



Gambar 6.2. Oksidasi dan reduksi dalam siklus C melalui fotosintesis dan respirasi.

6.3. Daerah Perakaran dan Rizosfer

Daerah perakaran berbeda dengan Rizosfir, tergantung pada sejauh mana derajat pengaruh akar tanaman dan kehidupan mikroorganismenya. **Daerah**

Abdul Kadir Salam – 2020

Perakaran menunjukkan ruang di dalam tubuh tanah yang ditumbuhi oleh akar tanaman, sedangkan **Rizosfir** adalah volume tanah, air, dan udara serta mikroorganisme yang terikat dekat di sekitar akar tanaman. Permukaan akar tanaman umumnya dikelilingi oleh bahan seperti gelatin yang berisi liat, sisa bahan organik, dan mikroorganisme.

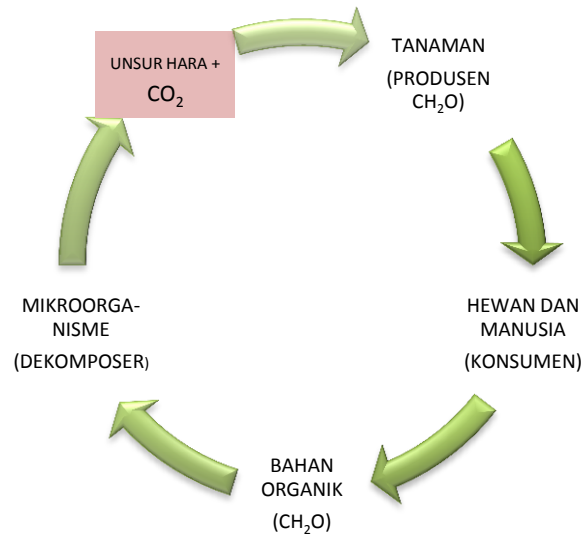
Sifat tanah di dalam rizosfir berubah drastis oleh kehadiran akar tanaman (Reddy dkk.,1987; Rendig dan Taylor, 1989). Akar tanaman menyerap air dan unsur hara dari rizosfir dan mengeluarkan ion H^+ dan CO_2 serta menyerap O_2 di dalam rizosfir. Ion H^+ dan CO_2 mengakibatkan penurunan pH di daerah perakaran tanaman sehingga unsur hara dari mineral tanah di dekatnya akan larut dan tersedia bagi tanaman. Selain itu, beberapa jenis asam organik juga dikeluarkan oleh akar tanaman, yang juga dapat menurunkan pH tanah di daerah perakaran. Perubahan pH di dalam Rizosfir berpengaruh juga terhadap berbagai sifat dan reaksi kimia tanah di dalamnya. Aktivitas enzim tanah termasuk Urease dan Fosfatase Asam serta ketersediaan N, P, dan K di Rizosfir lebih tinggi daripada di sekitarnya (Reddy dkk., 1987; Fang dkk.,2010). Penambahan mulsa sisa tanaman juga meningkatkan seluruh parameter kimia tanah tersebut.

6.4 Mikroorganisme Penghuni Tanah

Mikroorganisme memiliki banyak peranan di dalam sistem tanah (Alexander, 1977). Peran kehadiran mikroorganisme tanah yang paling jelas di dalam sistem tanah adalah melakukan perombakan bahan organik. Bahan organik mengandung berbagai unsur hara yang sebelumnya diserap oleh akar tanaman dan ditumpuk dalam bentuk senyawa fungsional atau bagian struktural berbagai makhluk hidup. Bahan ini oleh mikroorganisme tanah akhirnya didekomposisi menjadi anasir-anasir yang lebih sederhana dan dikembalikan ke dalam sistem tanah. Anasir-anasir ini kemudian dimanfaatkan lagi oleh tanaman, karena dalam bentuk nir-organik anasir-anasir ini dapat diserap oleh tanaman.

Berubahnya bahan organik menjadi anasir-anasir yang lebih sederhana yang dapat diserap dan dimanfaatkan oleh tanaman dan ditambah dengan terbentuknya kembali senyawa-senyawa organik melalui proses fotosintesis oleh tanaman disebut sebagai **Daur Karbon**. Dalam Siklus C, mikroorganisme yang terlibat dalam destruksi bahan organik menjadi anasir-anasirnya yang lebih sederhana disebut **Dekomposer (Gambar 6.3)**. Dekomposer memegang peranan penting dalam siklus yang melibatkan **Produser** (tanaman berhijau daun), **Konsumer** (hewan dan

manusia) dan **Dekomposer** (Mikroorganisme). Tanpa kehadiran dekomposer, penumpukan bahan organik secara besar-besaran di dalam lingkungan dipastikan akan terjadi. Penumpukan bahan organik secara besar-besaran umumnya terjadi di kota-kota besar dengan masyarakat yang hidup dengan pola modern dan konsumtif.



Gambar 6.3. Peranan dekomposer dalam siklus C di dalam sistem tanah –tanaman.

Karena melakukan perombakan bahan organik, mikroorganisme tanah juga penting dalam daur berbagai jenis unsur hara lain. Tanpa kehadiran mikroorganisme tanah, unsur hara di dalam sisa tanaman, hewan, dan manusia akan menumpuk dan tidak dapat dimanfaatkan kembali dalam daur unsur hara. Bila hal ini terjadi, akan timbul masalah besar, karena selain bahan organik akan terus menumpuk, daur unsur hara pun akan terputus. Dalam keadaan demikian, tanaman akan menjumpai masalah dalam memperoleh unsur hara yang dibutuhkannya. Oleh karena itu, mikroorganisme tanah menjadi salah satu faktor yang penting dalam pengelolaan tanah untuk pertanian dan lingkungan.

Mikroorganisme tanah berukuran sangat kecil dan jumlahnya sangat banyak. Secara umum berlaku hukum alam bahwa semakin kecil ukuran organisme maka akan semakin banyak jumlahnya. Selain itu, semakin kecil ukuran organisme juga semakin banyak pengaruhnya terhadap lingkungan. Perkiraan menunjukkan bahwa dalam satu gram contoh tanah terdapat sekitar satu juta sampai satu milyar mikroorganisme tanah. Oleh karena itu, mikroorganisme tanah akan berpengaruh besar terhadap dinamika tanah. Sebagian besar dari mikroorganisme tanah ini bermanfaat bagi pertanian, namun sebagian lagi bersifat patogen yang merugikan tanaman.

Telah dilaporkan bahwa di dalam tanah terdapat berbagai jenis mikroorganisme, yang secara umum dibagi menjadi kelompok **Prokariot**, yang tidak jelas termasuk flora atau fauna, dan kelompok **Eukariot**, yang mencakup flora dan fauna (Singer dan Munns, 1987). Yang termasuk Prokariot adalah Bakteri, Aktinomisetes, dan Ganggang Hijau Biru; sedangkan yang termasuk Eukariot adalah sebagian besar jamur dan protozoa (**Tabel 6.2**).

Bakteri merupakan mikroorganisme yang termasuk kelompok Prokariot. Mikroorganisme ini berperan penting dalam mendekomposisi sisa tanaman. Makhluk ini adalah tanaman bersel satu dan merupakan makhluk hidup dengan populasi paling tinggi di dalam sistem tanah. Populasinya lebih tinggi dalam topsoil dan menurun dengan kedalaman tanah (Singer dan Munns, 1987). Sebagian mikroorganisme tanah di subsoil berasal dari topsoil, yang terbawa oleh perkolasi air.

Berbeda dengan jamur, bakteri pada umumnya akan hidup lebih baik pada pH netral atau alkalin. Oleh karena itu penurunan pH, misalnya sebagai akibat berbagai proses seperti pembuangan limbah industri asam dan hujan asam, akan menekan populasi dan aktivitas makhluk hidup ini. Sebaliknya, pengapuran, yang meningkatkan pH tanah, akan berpengaruh baik bagi kehidupan bakteri. Baru-baru ini telah dilaporkan bahwa pengapuran pada lapisan 0-5 cm tanah Oxisol (Typic Hapludox) di Brazil selain meningkatkan pH tanah, juga meningkatkan populasi dan aktivitas mikroorganisme dan nisbah bakteri/jamur (Garbuio dkk., 2011). Ini merupakan salah satu pengaruh positif dari pengapuran dalam rangka meningkatkan kesuburan tanah.

Aktinomisetes adalah bakteri bermiselium yang menyerupai untaian benang. Mikroorganisme ini menempati tanah kering yang hangat. Populasi Prokariot ini di dalam tanah cukup tinggi. Populasinya menurun dengan kedalaman tanah, namun penurunannya tidak secepat bakteri. Ini menunjukkan bahwa bakteri lebih rentan terhadap sifat-sifat subsoil daripada Aktinomisetes sehingga bakteri lebih terkonsentrasi pada topsoil (Singer dan Munns, 1987).

Tabel 6.2. Pengelompokan mikroorganisme tanah*.

Kelompok	Jenis	Keterangan
Prokariot	Bakteri Aktinomisetes Ganggang Hijau Biru	Tidak jelas apakah flora atau fauna
Eukariot	Jamur (Sebagian Besar) Mikoriza (Simbiosis) <i>Lichens</i> (Simbiosis) Protozoa (Amuba, Ciliata, Flagelata)	Flora Flora Flora Fauna

*Diadaptasi dari Singer dan Munns (1987)

Ganggang, meliputi Ganggang Hijau dan Ganggang Hijau Biru, banyak dijumpai di permukaan tanah basah (Singer dan Munns, 1987). Ganggang Hijau Biru yang bersimbiosis dengan *Azolla sp.* di tanah sawah berperan dalam memiksasi N dan menyumbangkan N untuk pertumbuhan tanaman padi. Kehadiran ganggang ini di tanah sawah bila dikelola dengan baik akan dapat meningkatkan keefisienan pemupukan N karena dapat mengurangi masukan N melalui pupuk buatan dan mengganti sebagiannya dengan N dari N₂ udara. Oleh karena itu, meningkatkan kesuburan tanah sawah akan lebih baik bila dibarengi dengan pengelolaan ganggang.

Jamur juga merupakan mikroorganisme yang paling banyak ditemui di dalam tanah. Tanaman ini multisel dengan berbagai ukuran, dari yang berukuran mikroskopik sampai dengan jamur besar yang ditemui di tanah basah yang tidak diolah (Singer dan Munns, 1987). Jamur yang banyak ditemui di tanah adalah yang tersusun dari massa serat yang disebut miselium. Jamur banyak ditemui di tanah asam dengan pH 4.5- 5.5 sehingga tidak berkompetisi dengan bakteri, yang banyak ditemui di tanah netral. Peningkatan pH akan menekan pertumbuhan dan perkembangan jamur, sehingga pengapuran akan menekan populasi dan

aktivitasnya. Dari sisi peranannya, jamur lebih banyak berperan dalam mendekomposisi bahan organik daripada bakteri.

Jamur di dalam tanah juga melakukan simbiosis. Di antara bentuk simbiosis jamur yang sangat terkenal dan banyak diteliti adalah mikoriza (Yusnaini dkk., 1998; Rini, 2004). **Mikoriza** merupakan simbiosis jamur dengan akar tanaman. Hifa dan miselium jamur menjulur ke akar dari berbagai jenis tanaman tingkat tinggi sehingga dapat meningkatkan keefisienan tanaman dalam menyerap unsur hara dan air. Hifa jamur menyerap air dan unsur hara dari tanah dan mengangkutnya ke akar tanaman. Sebaliknya, akar tanaman melindungi dan memberi makanan kepada jamur. Dengan kehadiran mikoriza, bidang dan daya serap akar tanaman inang meningkat tajam, sehingga meningkatkan keefisienan akar tanaman dalam mengeksplorasi dan menyerap unsur hara dari sistem tanah (Rendig dan Taylor, 1989). Rini (2004) melaporkan bahwa inokulasi mikoriza pada akar kelapa sawit meningkatkan tinggi tanaman, bobot kering tajuk, dan serapan P oleh tanaman. Inokulasi ini juga meningkatkan jumlah dan panjang akar, baik akar primer, akar sekunder, maupun akar tersier.

Lichen adalah jenis simbiosis lain antara jamur dan ganggang hijau biru. Tanaman ini merupakan pionir, yang dapat hidup di atas batu karena dapat memiksasi N dan melarutkan unsur hara dari batuan. Lichen mengekskresikan berbagai jenis asam organik yang dapat mempercepat pelapukan batuan sehingga membebaskan berbagai jenis unsur hara. Nitrogen dan unsur hara yang didapatkan dari udara dan batuan mengakibatkan lichen dapat bertumbuh dan berkembang dengan baik. Dalam jangka waktu yang panjang, lichen akan dapat mengubah batuan menjadi tanah, yang dapat ditumbuhi oleh berbagai jenis tanaman lain.

Protozoa mencakup Amuba, Ciliata, dan Flagelata. Protozoa adalah binatang bersel satu, yang banyak terdapat di dalam tanah yang basah dan mengandung humus. Binatang ini hidup di lapisan air di sekitar partikel tanah. Binatang ini juga memiliki peranan penting dalam mendekomposisi bahan organik di dalam tanah (Singer dan Munns, 1987).

Pertumbuhan dan perkembangan serta aktivitas mikroorganisme tanah dipengaruhi oleh banyak faktor lingkungan. Di antara faktor tersebut yang terpenting adalah pH tanah, kadar air dan temperatur tanah, status unsur hara di dalam tanah, kandungan bahan organik dan sistem olah tanah yang diterapkan, dan jenis vegetasi. Telah diungkapkan bahwa setiap jenis mikroorganisme cocok pada lingkungan pH tertentu. Misalnya jamur lebih menyukai lingkungan dengan pH rendah, sehingga peningkatan pH dapat menurunkan baik populasi maupun aktivitasnya di dalam tanah. Sebaliknya, bakteri lebih adaptif dengan lingkungan

netral atau alkalin. Peningkatan pH tanah akan meningkatkan populasi dan aktivitasnya di dalam tanah.

Status unsur hara di dalam tanah juga sangat menentukan pertumbuhan dan perkembangan mikroorganisme tanah. Kandungan bahan organik, yang menunjukkan kandungan C (% Bahan Organik = 1.5–2 kali % C Organik) sangat menentukan aktivitas mikroorganisme tanah, seperti ditunjukkan oleh meningkatnya evolusi CO₂ dan aktivitas enzim dengan meningkatnya kandungan bahan organik tanah (Salam dkk., 1998d; 1999d; 1999e; Yusnaini dkk., 2007). Beberapa fakta juga menunjukkan bahwa populasi dan aktivitas mikroorganisme tanah juga berbanding lurus dengan kandungan N total di dalam tanah (Salam dkk., 1998d; 1999d; 1999e). Ini dapat difahami karena N adalah unsur hara penting dalam sintesis protein di dalam tubuh mikroorganisme.

Oleh karena hal-hal di atas, sistem olah tanah, yang berpengaruh terhadap kandungan bahan organik, berpengaruh juga terhadap pertumbuhan dan perkembangan mikroorganisme tanah. Telah diungkapkan sebelumnya bahwa sistem olah tanah konservasi dapat memelihara kandungan bahan organik tanah; sebaliknya, sistem olah tanah intensif (olah tanah konvensional) dapat mempercepat penurunan kandungan bahan organik tanah (Deng dan Tabatabai, 1996). Demikian pula halnya dengan jenis vegetasi, karena menghasilkan kandungan bahan organik yang berbeda kuantitas maupun kualitasnya, maka akan berpengaruh juga terhadap kehidupan mikroorganisme tanah (Salam dkk., 1998d; Pujiyanto dkk., 1983).

Air merupakan kebutuhan dasar mikroorganisme tanah. Data menunjukkan bahwa populasi dan aktivitas mikroorganisme meningkat dengan meningkatnya kadar air tanah. Beberapa indikatornya adalah peningkatan produksi enzim tanah dengan meningkatnya kadar air tanah (Salam, 1998a). Demikian juga temperatur tanah, yang sangat berkaitan dengan kadar air sebagai penyangga temperatur tanah. Umumnya mikroorganisme akan tumbuh dan berkembang lebih baik dengan meningkatnya kadar air dan temperatur tanah.

Kemanfaatan mikroorganisme tanah dapat digunakan untuk mengembangkan berbagai jenis pupuk biologis. Pupuk biologis adalah pupuk yang berisi agen biologis yang dapat menghasilkan senyawa-senyawa kimia tertentu yang dapat mempercepat penyediaan unsur hara dari sumber-sumber unsur hara di dalam sistem tanah. Pada saat diterapkan, pupuk biologis segera bereaksi dengan menghasilkan pertumbuhan dan perkembangan mikroorganisme secara pesat sehingga mikroorganisme dapat melakukan aktivitasnya dengan baik, salah satunya adalah dengan menghasilkan cukup banyak enzim tertentu. Keberadaan enzim tanah dengan sendirinya akan membantu tanaman untuk memperoleh unsur hara

yang dibutuhkannya. Pupuk biologis sifatnya sebagai starter untuk membantu tanaman agar dapat memanfaatkan unsur hara di dalam bahan organik tanah dengan baik.

Sebagian pupuk biologis juga dapat mengandung mikoriza, sebuah jamur yang bersimbiosis dengan akar tanaman, sehingga permukaan serap akar tanaman meluas dan daya serapnya terhadap unsur hara di sekitar akar tanaman lebih intensif. Dalam prosesnya, mungkin juga dihasilkan berbagai jenis enzim oleh mikroorganisme tanah. Kehadiran enzim-enzim ini dapat meningkatkan kecepatan dekomposisi berbagai bahan organik sehingga membebaskan unsur hara struktural yang tidak tersedia menjadi unsur hara nir-organik yang tersedia bagi tanaman. **Rhizobium** juga dapat digunakan sebagai pupuk biologis. Bakteri ini dapat bersimbiosis dengan akar tanaman **legume** membentuk bintil-bintil akar yang dapat memiksasi N dari udara. Kehadiran *Rhizobium* di dalam akar tanaman akan menurunkan kebutuhan introduksi N dari sumber-sumber eksternal.

Dengan demikian, pupuk biologis berisi agen perubahan. Pada saat pupuk biologis diterapkan ke dalam sistem tanah maka yang bergerak aktif adalah agen perubahan berupa mikroorganisme tertentu. Setelah melakukan aktivitasnya, bahan aktif pupuk ini secara tidak langsung dapat menciptakan suatu kondisi sehingga proses penyediaan unsur hara dari berbagai sumber menjadi lebih baik. Namun demikian, pupuk biologis juga dapat memengaruhi komunitas mikroorganisme yang lain, yang dapat berpengaruh baik atau buruk dalam penyediaan unsur hara lain (Luo dkk., 2010).

6.5 Makroorganisme Penghuni Tanah dan Akar Tanaman

Yang termasuk ke dalam kelompok **Makroorganisme** di antaranya adalah Nematoda, Cacing Tanah, Semut, Tikus, dan Marmut (**Tabel 6.3**) (Singer dan Munns, 1987). **Nematoda** merupakan binatang Non-Artropoda. Cacing ini tidak memiliki segmentasi, tidak berwarna, banyak terdapat di dalam tanah. Umumnya binatang ini berukuran kecil dan hidup saprofit (hidup dari sisa tanaman yang telah mati) dan sebagian di antaranya juga parasitik dan hidup di akar tanaman sehingga dapat merugikan tanaman.

Cacing Tanah berperan mencampur sisa tanaman dengan bahan mineral tanah. Cacing tanah mengangkut banyak bahan organik dari permukaan tanah ke dalam tanah sehingga memperkaya tanah dengan bahan organik. Cacing tanah

Abdul Kadir Salam – 2020

juga membuat lubang di dalam tanah sehingga meningkatkan porositas tanah dan dapat meningkatkan infiltrasi dan perkolasi air. Peranan cacing tanah terkait dengan perubahan porositas total tanah adalah: (a) pembesaran pori dengan melakukan tekanan dan pengangkutan material tanah, (b) pembentukan pori tanah baru dengan cara membuat lubang, dan (c) mengisi pori tanah dengan material dari tempat lain sehingga mengakibatkan reduksi ukuran pori tanah. Pori makro seperti ini sangat berguna dalam pengangkutan air serta bahan kimia di dalam tanah, termasuk bahan-bahan toksik seperti logam berat dan pestisida (Edwards, dkk., 1993; Li dan Ghodrati, 1997). Alegre dkk. (1996) melaporkan bahwa inokulasi cacing tanah ke dalam Ultisol di wilayah Amazon Peru meningkatkan agregat makro (> 10 mm) dari 25.1 menjadi 32.7% dan menurunkan agregat mikro (< 2 mm) dari 33.2 menjadi 26.1%. Namun, inokulasi ini menurunkan porositas dan kerapatan isi tanah.

Tabel 6.3. Makroorganisme tanah dan peranannya.

Jenis Organisme	Manfaat
Nematoda	Dekomposer
Cacing Tanah	Mencampur sisa tanaman dengan bahan mineral tanah antar-lapisan tanah; Menciptakan pori tanah makro sehingga meningkatkan porositas tanah; Menghasilkan enzim fosfatase alkalin; Menyuburkan tanah
Semut	Mengangkut partikel-partikel tanah dari subsoil; Menyuburkan tanah
Tikus	Mengolah tanah; Meningkatkan porositas tanah
Marmut	Mengolah tanah; Meningkatkan porositas tanah

Selain itu, cacing tanah juga membawa residu dalam bentuk kasting ke permukaan tanah. Bila mati, cacing tanah juga dapat memperkaya tanah dengan hasil dekomposisi dari tubuhnya. Secara biokimia, cacing juga sangat bermanfaat

Abdul Kadir Salam – 2020

karena menghasilkan enzim fosfatase alkalin, yang berperan dalam mendekomposisi P-organik, yang tidak tersedia bagi tanaman, menjadi ortofosfat, yang tersedia bagi tanaman. Beberapa peneliti melaporkan bahwa aktivitas fosfatase di dalam tanah yang dihuni oleh cacing tanah lebih tinggi daripada di dalam tanah kontrol (Ross dan Cairns, 1982; Satchell dan Martin, 1984). Salah satu cacing tanah adalah *Lumbriscus terrestris* (Edwards dan Lofty, 1977).

Semut adalah fauna yang termasuk binatang **Artropoda**. Kegiatan semut di dalam sistem tanah adalah mengangkut partikel-partikel tanah dari lapisan bawah dan membentuk gunung di atas permukaan tanah. Karena semut berukuran kecil, partikel yang diangkut juga berukuran kecil. Di gunung hasil aktivitas semut tidak akan ditemui batu atau kerikil, tetapi sebagian besar terdiri dari tanah lapisan bawah dan bahan organik yang diambil dari tumbuhan yang ditemui di sekelilingnya. Aktivitas ini menyuburkan tanah.

Tikus dan **marmut** merupakan contoh binatang **Vertebrata**. Binatang ini membuat banyak lubang-lubang di dalam tubuh tanah. Aktivitas ini membawa butiran tanah lapisan bawah ke permukaan tanah. Namun karena aktivitasnya dilakukan di tanah kering maka bahan yang diangkut umumnya berupa pasir dan kerikil. Dengan aktivitas ini, secara lokal tikus dan marmut mengolah tanah dan akhirnya tanah kaya dengan bahan organik asal sisa tanaman dan kotoran hewan ini.

Akar Tanaman memiliki kelebihan dibandingkan dengan hewan makroorganisme. Akar tanaman dapat mengisi pori-pori mikro, meso, dan makro, bahkan selama pertumbuhan dan perkembangannya akar tanaman dapat mengisi rongga besar yang dibuatnya sendiri, sehingga setelah mati akar tanaman akan meninggalkan sejumlah pori dari ukuran mikro sampai supermakro.

Kelebihan akar tanaman dibandingkan dengan makro-mikroorganisme adalah kehadirannya dapat menimbulkan beberapa perubahan di dalam sistem tanah. Selain dapat menghasilkan pori dengan berbagai ukuran ketika masih hidup, kehadiran akar tanaman dapat mengikat agregat-agregat tanah sehingga lebih mantap dan tahan terhadap tekanan gaya fisika seperti erosi. Selain itu, berbagai ion dan senyawa yang dikeluarkannya dapat memengaruhi reaksi tanah. Misalnya, ekskresi ion H^+ dan asam-asam organik dapat mengasamkan tanah, yang akibatnya memengaruhi sifat tanah lainnya. Produksi CO_2 akibat respirasi bahan organik (CH_2O) untuk memperoleh energi juga dapat mengasamkan tanah di sekitar perakaran tanaman (**Reaksi 2.1**). Akar tanaman yang mati dan membusuk juga menyumbangkan bahan organik yang memiliki banyak sekali manfaat. Selain menghitamkan warna tanah, bahan organik ini juga dapat memperkuat agregasi tanah dan menjadi sumber C bagi kehidupan biologi tanah (Emerson dkk., 1986).

Abdul Kadir Salam – 2020

Selain peranan di atas, akar tanaman juga menghasilkan berbagai jenis enzim tanah untuk memudahkan akar tanaman dalam menggunakan unsur hara dari sumber-sumber organik melalui dekomposisi, misalnya fosfatase, arilsulfatase, dll. (Tabatabai, 1982). Produksi enzim oleh akar tanaman berbeda tergantung pada jenis tanaman (Salam dkk., 1999d; 1999e; 2001). Misalnya, telah dilaporkan bahwa fosfatase asam dan fosfatase alkalin lebih tinggi di daerah perakaran alang-alang dibandingkan dengan di daerah perakaran teki wudelan, bayam duri, dan bayam cabut (Salam dkk., 1997a).

6.6 Daur Karbon, Nitrogen, dan Belerang

Berbeda dengan unsur hara lain pada umumnya seperti Ca, Mg, K, dan seterusnya yang berasal dari pelapukan mineral tanah, N diperoleh tanaman dari udara melalui suatu proses yang cukup panjang. Atmosfir mengandung berbagai gas, di antaranya adalah 78% N₂. Namun demikian, bentuk N ini tidak tersedia bagi tanaman. Oleh karena itu, N udara harus diubah dulu menjadi bentuk yang tersedia bagi tanaman.

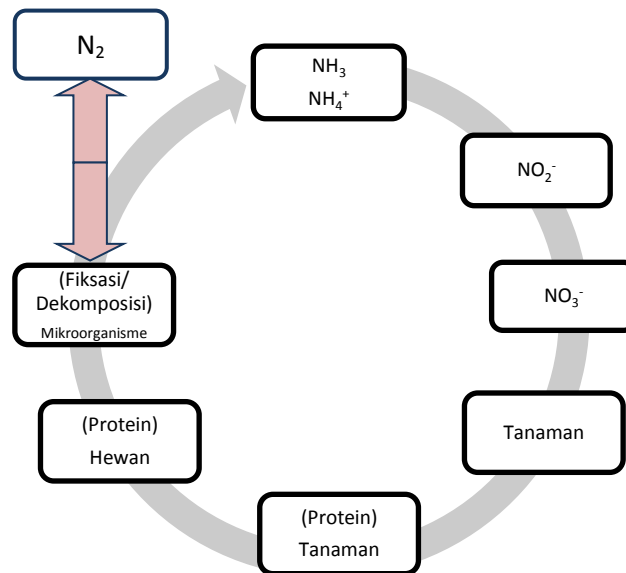
Nitrogen dari atmosfer masuk ke dalam tubuh bakteri dan akar tanaman tertentu di dalam sistem tanah melalui proses fiksasi, di antaranya diperoleh dengan bantuan mikroorganisme pemiksasi N (Rendig dan Taylor, 1989). Salah satu mikroorganisme ini adalah bakteri *Rhizobium sp.* yang berasosiasi dengan akar tanaman polong (legume). Nitrogen dalam N₂ akhirnya diubah menjadi NH₄⁺ dan NO₃⁻, yang dapat diserap dan dimanfaatkan oleh tanaman untuk membentuk berbagai senyawa fungsional dan struktural. Nitrogen fungsional dan struktural di dalam bahan organik dan jaringan mikroorganisme tanah akhirnya akan kembali diubah menjadi bentuk N-nir-organik yang dapat diserap kembali oleh akar tanaman setelah melalui proses dekomposisi. Sebagian dari N nir-organik kembali ke atmosfer melalui reaksi penguapan.

Proses perubahan N dari N₂ di atmosfer menjadi NH₄⁺ dan NO₃⁻ di dalam air tanah, kemudian diserap dan diubah oleh tanaman menjadi senyawa fungsional dan struktural di dalam tanaman dan kemudian mengalami dekomposisi sehingga kembali menjadi N nir-organik (NH₄⁺ dan NO₃⁻) yang siap untuk kembali diserap oleh akar tanaman membentuk sebuah daur. Daur ini disebut **Daur Nitrogen (Gambar 6.4)**. Pendauren seperti ini juga terjadi pada unsur hara C (Daur Karbon), S (*Daur Sulfur*), dan unsur-unsur hara lainnya. Daur Karbon telah sebelumnya diutarakan (**Gambar 6.2**).

Abdul Kadir Salam – 2020

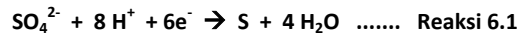
Organisme yang dapat mengikat N dari udara atmosfer adalah bakteri pengikat N; disebut demikian karena memiliki kemampuan dalam mengikat N udara dan menginkorporasikannya ke dalam tubuhnya. Sebagian bakteri ini hidup bersimbiosis dengan akar tanaman tertentu. Tanaman polong seperti kedelai dan kacang tanah merupakan inang bagi bakteri pengikat N seperti ini (misalnya *Rhizobium*). Dalam simbiosis ini, bakteri memasok dirinya dan tanaman dengan N. Sebaliknya, tanaman memasok unsur hara dan air yang diperlukan oleh bakteri.

Selain bakteri yang bersimbiosis di atas, di dalam tanah juga ditemui bakteri pengikat N udara yang hidup di luar nodul pada akar tanaman atau hidup bebas di dalam tanah. Misalnya, bakteri dari Genus **Azotobacter** dan **Azospillum**, yang dapat mengikat N dari udara. Nitrogen tersebut akhirnya menjadi tersedia bagi tanaman setelah bakteri tersebut mati dan terdekomposisi.

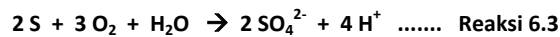
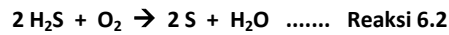


Gambar 6.4. Daur Nitrogen.

Daur S melibatkan baik reduksi maupun oksidasi senyawa-senyawa S dengan melibatkan mikroorganisme antara lain *Desulfovibrium* dan *Thiobacillus thiooxidans*. Proses reduksi mengikuti reaksi sebagai berikut:

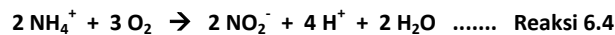


Sedangkan oksidasi melibatkan reaksi-reaksi sebagai berikut:

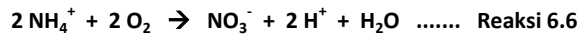


6.7 Nitifikasi dan Denitrifikasi

Nitrogen dalam bentuk protein tidak dapat tersedia bagi tanaman, sehingga tanaman tidak dapat memanfaatkannya sebelum diubah menjadi bentuk-bentuk nir-organik. Namun demikian, di dalam siklus N, protein ini dapat didekomposisi oleh berbagai jenis mikroorganisme tanah dan membebaskan N dalam bentuk NH_3 . Gas NH_3 ini akhirnya berubah bentuk menjadi NH_4^+ bila larut di dalam air dan mengalami pemuatan dengan penambahan ion H^+ (**Amonifikasi**). Bentuk N ini dengan mudah dapat diserap oleh akar tanaman. Namun demikian, kebutuhan N umumnya tidak dapat dipenuhi oleh bentuk NH_4^+ kecuali untuk tanaman padi. Ion NH_4^+ selanjutnya dapat dioksidasi dalam keadaan oksidatif (Potensial Redoks tinggi) oleh bakteri tertentu menjadi NO_3^- melalui reaksi dua tahap yang disebut proses **Nitrifikasi** sebagai berikut: NH_4^+ menjadi NO_2^- (Agen: Bakteri *Nitrosomonas*) dan $\text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO}_3^-$ (Agen: Bakteri *Nitrobakter*) (Bartlett, 1981). Reaksi tersebut berjalan sebagai berikut:



Secara keseluruhan, proses tersebut dapat diringkas sebagai berikut:



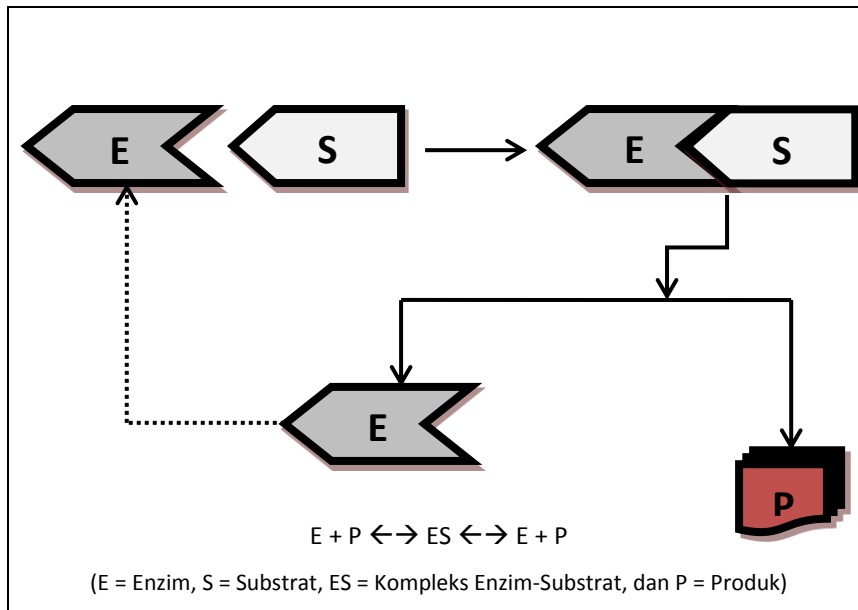
Wu dkk. (2011) melaporkan bahwa bakteri pengoksidasi amonia meningkat tajam sampai 50 kali lipat di tanah yang dipupuk jangka panjang. Ini menunjukkan bahwa proses nitrifikasi akan berlangsung lebih cepat dengan kehadiran pupuk N. Sebaliknya, akar tanaman tertentu seperti rumput *Brachiaria humidicola* (Randle) Schweick mengekskresikan senyawa penghambat nitrifikasi. Senyawa ini menghambat kerja bakteri nitrifikasi tetapi tidak memengaruhi mikroorganisme tanah penting lainnya (Gopalakrishnan dkk., 2009).

Ion NO_3^- yang dihasilkan adalah bentuk N yang dapat diserap oleh kebanyakan tanaman. Nitrogen akan dapat kembali ke atmosfer melalui proses denitrifikasi, khususnya bila tanah dalam kondisi tergenang (Potensial Redoks rendah) (Bartlett, 1981). Kondisi tergenang mengakibatkan tanah bersifat reduktif, sehingga menyebabkan NO_3^- tereduksi menjadi N_2 (Bilangan oksidasi N turun dari +5 dalam ion NO_3^- menjadi 0 dalam molekul N_2) yang mudah menguap. Proses ini akan terjadi pada tanah sawah bila Urea dibanamkan ke dalam air sawah. Kliewer dan Gillian (1995) juga melaporkan bahwa pengelolaan tanah dengan menaikkan permukaan air bawah tanah dapat mengakibatkan terjadinya denitrifikasi. Dalam keadaan demikian produksi NO_3^- menurun sehingga potensi pencemarannya terhadap lingkungan air menurun dan pengasaman tanah dapat diminimalisasi. Namun, proses ini akan mengakibatkan kehilangan N dalam bentuk N_2O melalui denitrifikasi.

6.8 Produksi Enzim Tanah dan Asam Organik

Dalam melakukan aktivitasnya untuk memperoleh energi dari bahan organik, mikroorganisme, makroorganisme, dan akar tanaman memproduksi berbagai jenis enzim. Karena bekerja dalam biosiklus berbagai jenis unsur hara di dalam sistem tanah (Tate III, 1987; Tabatabai, 1982), enzim ini disebut **Enzim Tanah**. Seperti pada umumnya enzim, Enzim Tanah berperan sebagai katalisator. Katalisator berperan mempercepat reaksi biokimia tanah yang merombak reaktan membentuk produk-produk tertentu tanpa terlibat dalam reaksi tersebut. Dengan demikian, setelah reaksi berlangsung, enzim tanah akan kembali menjadi senyawa seperti semula sehingga dapat kembali berpartisipasi mempercepat reaksi biokimia yang sama. Secara sederhana, reaksi yang dikatalisasi oleh enzim tanah dapat digambarkan sebagai berikut (**Gambar 6.5**).

Abdul Kadir Salam – 2020



Gambar 6.5. Katalisasi reaksi biokimia oleh enzim tanah.

Di dalam sistem tanah terdapat berbagai jenis enzim yang diproduksi oleh mikroorganisme, makroorganisme (misalnya cacing tanah), dan akar tanaman (Hayano, 1973; Frankenberger, Jr. dan Dick, 1983; Satchell dkk., 1984; Satchell dan Martin, 1984; Nasution, 1986; Tate III, 1987; Park dkk., 1992; Sakai dan Tadano, 1993; Joner dkk., 1995; Vinotha dkk., 2000; Supriatin dkk., 2007; Song dkk., 2012). Telah dilaporkan bahwa aktivitas fosfatase di dalam tanah yang dihuni oleh cacing tanah lebih tinggi daripada di dalam tanah kontrol (Ross dan Cairns, 1982; Satchell dan Martin, 1984). Tanah hutan juga menunjukkan aktivitas fosfatase yang lebih tinggi daripada tanah pertanian (Salam dkk., 1997c; Salam dkk., 1998d). Beberapa peneliti juga menemukan bahwa aktivitas fosfatase asam dan fosfatase alkalin lebih tinggi di daerah perakaran tanaman dan menurun ke arah tanah yang tidak dihuni oleh akar tanaman (Joner dan Jakobsen, 1995).

Konversi penggunaan lahan mengubah berbagai sifat tanah yang secara langsung atau pun tidak langsung berpengaruh terhadap aktivitas enzim tanah, misalnya pH tanah (Salam dkk., 1998), kadar air tanah (Klein dan Koths, 1980;

Baligar dkk., 1988), temperatur tanah (Dash dkk., 1981; Moyo dkk., 1989; Neal, 1990), kandungan bahan organik tanah (Nannipieri dkk., 1980; Baruah dan Mishra, 1984; Tate III, 1984; Baligar dkk., 1988; Salam dkk, 1998d), ketersediaan P tanah (Pang dan Kolenko, 1986; Fox dan Comerford, 1992); jenis vegetasi, akar tanaman, dan mikroorganisme tanah (Duxbury dan Tate III, 1981; Frankenberger dan Dick, 1983; Jha dkk., 1992). Misalnya, di wilayah India Timur Laut, aktivitas enzim tanah seperti dehidrogenase, urease, dan fosfatase, lebih tinggi di wilayah yang belum terdegradasi dibandingkan dengan di wilayah yang telah terdegradasi akibat lebih rendahnya populasi jamur dan bakteri di wilayah yang telah terdegradasi.

Enzim di dalam tanah ditemui dalam berbagai bentuk. Enzim di dalam tanah terdapat dalam bentuk larut atau terjerap (Sarkar dkk., 1989; Tabatabai dan Fu, 1992). Enzim larut, yang merupakan bagian yang aktif dalam transformasi unsur bentuk organik menjadi bentuk nir-organik, berada dalam kesetimbangan dengan enzim terjerap, yang berada dalam keadaan tidak aktif (Huang dkk., 1995). Enzim larut dapat dengan mudah bergerak bersama air melalui air perkolasi dan/atau air limpasan permukaan, sedangkan enzim terjerap terikat kuat dan dapat bergerak hanya bersama partikel-partikel tanah sebagai akibat dari proses erosi (Tabatabai dan Fu, 1992). Beberapa peneliti juga menyatakan bahwa sebagian enzim yang terjerap juga berpartisipasi aktif dalam proses transformasi (Dick dan Tabatabai, 1987). Namun, umumnya peneliti sepakat bahwa sebagian besar enzim yang aktif adalah yang berada dalam bentuk larut di dalam air tanah (Huang dkk., 1995).

Di antara enzim tanah yang penting dalam pertanian adalah enzim yang terlibat dalam daur N, P, dan S, yaitu Urease, Fosfatase, dan Arilsulfatase. Urease merupakan enzim tanah yang berperan mengatalisasi hidrolisis Urea di dalam sistem tanah (**Reaksi 2.3**) (Tabatabai, 1982). Karena produk hidrolisis Urea adalah NH_3 , yang rentan mengalami reaksi lanjutan, yaitu amonifikasi, nitrifikasi, dan denitrifikasi, keberadaannya di dalam sistem tanah akan menurunkan keefisienan pemupukan N karena sebagian N dapat hilang dari sistem tanah melalui pencucian ion NO_3^- atau penguapan dalam bentuk N_2 . Untuk menghindari hilangnya N, maka keberadaan Urease harus dihambat dengan senyawa tertentu yang dapat mengurangi aktivitas Urease atau disebut ***Urease Inhibitor***. Saat ini telah dikembangkan berbagai jenis *Urease Inhibitor*.

Berbeda dengan Urease, kehadiran Fosfatase dan Arilsulfatase di dalam sistem tanah sangat diinginkan karena dapat meningkatkan ketersediaan P dan S. Fosfatase berperan dalam merombak P organik, yang tidak dapat diserap oleh akar tanaman, menjadi ortofosfat primer dan ortofosfat sekunder (H_2PO_4^- dan HPO_4^{2-}), yang dapat diserap dan dimanfaatkan oleh tanaman (Tabatabai, 1982; Rojo dkk., 1990). Fosfatase umumnya dibedakan menjadi dua kelompok, yaitu Fosfatase

Asam dan Fosfatase Alkalin. Perbedaan antara kedua jenis fosfatase tersebut didasarkan pada teknik penetapan aktivitasnya di dalam tanah, yang didasarkan pada pH optimum, yang untuk tanah asam berada pada pH 4-6 (Juma dan Tabatabai, 1978). Aktivitas Fosfatase Asam ditetapkan pada pH < 7 (Trasar-Cepeda dan Gil-Sotres, 1987; 1988; Garcia dkk.,1993), yaitu dengan pH 6.5 (Frankenberger dan Johanson, 1982) atau pH 7.0 (Pang dan Kolenko, 1986). Aktivitas Fosfatase Alkalin ditetapkan pada pH di atas netral atau > 7 (Trasar-Cepeda dan Gil-Sotres, 1987; 1988; Garcia dkk.,1993), umumnya pada pH 11.0 (Frankenberger dan Johanson, 1982; Tabatabai, 1982). Arilsulfatase adalah enzim yang mengatalisasi perombakan S organik, yang tidak dapat diserap oleh akar tanaman, menjadi SO_4^{2-} , yang dapat diserap oleh akar tanaman. Oleh karena itu, kehadiran kedua jenis enzim ini perlu ditingkatkan. Penyediaan ortofosfat dan sulfat asal sumber-sumber organik berpotensi mengurangi penambahan P dan S asal pupuk komersial untuk memenuhi kebutuhan tanaman.

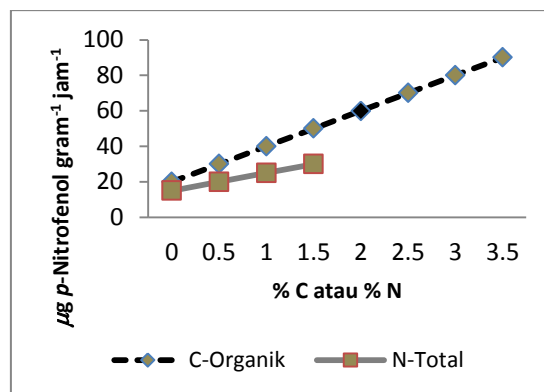
Kecepatan reaksi biokimia di dalam sistem tanah di atas dipengaruhi sedikitnya oleh empat faktor, yang melibatkan berbagai faktor biotik dan faktor abiotik (Baligar dkk., 1988). Faktor pertama adalah keberadaan dan jumlah substrat di dalam sistem tanah, yaitu bahan organik. Hubungan langsung antara aktivitas beberapa jenis enzim tanah dengan C-organik atau kandungan bahan organik dan N-total tanah telah banyak dilaporkan (Nannipieri dkk., 1980; Harrison, 1983; Trasar-Cepeda dan Gil-Sotres, 1987; Bonmati dkk., 1991; Tate III dkk., 1991; Martens dkk., 1992; Salam, 1996; Salam dkk., 1998d). Salam dkk. (1998d) melaporkan bahwa aktivitas enzim tanah mencakup Fosfatase Asam, Fosfatase Alkalin, Urease, dan Arilsulfatase, menurun dengan urutan Hutan Primer, Hutan Sekunder, dan lahan pertanian, sejalan dengan penurunan kandungan bahan organik di dalam tanah tersebut. Tate III dkk. (1991) juga melaporkan bahwa aktivitas mikroorganisme dan fosfatase di Horizon O tanah yang kaya akan bahan organik adalah 2 sampai dengan 25 kali lebih tinggi daripada di Horizon A, yang memiliki kandungan bahan organik lebih rendah. Hubungan ini berkaitan dengan peranan bahan organik sebagai sumber energi.

Hasil kerja enzim tanah terhadap substrat yang terukur oleh pembebasan *p*-Nitrofenol per satuan berat tanah per satuan waktu telah ditemukan berbanding lurus dengan jumlah substrat berupa bahan organik (C-Organik dan N-Total) (Nannipieri dkk., 1980; Baruah dan Mishra 1984; Tate III, 1984; Salam dkk., 1998d; 1999d); semakin tinggi kandungan bahan organik tanah akan semakin tinggi pula kecepatan reaksi biokimia yang terjadi. Hal ini dapat difahami karena substrat adalah sumber energi bagi organisme penghasil enzim tanah. Hubungan produksi *p*-Nitrofenol dengan kandungan C-organik atau N-total disajikan pada **Gambar 6.6**.

Abdul Kadir Salam – 2020

Wang dkk. (2012) juga menunjukkan korelasi antara aktivitas fosfatase dengan hasil uji P lapisan atas (0-5 cm) dan kandungan P dalam air permukaan tanah sawah.

Faktor substrat berupa bahan organik tanah juga dipengaruhi oleh beberapa faktor, di antaranya adalah jenis penggunaan lahan, jenis vegetasi, dan sistem olah tanah. Telah diungkapkan bahwa kandungan bahan organik dalam tanah hutan primer jauh lebih tinggi daripada dalam tanah hutan sekunder dan lahan pertanian (**Tabel 3.7**). Bahan organik di hutan primer terpelihara oleh minimnya gangguan dan tingginya masukan serasah dan bahan organik dari sisa-sisa tanaman, sedangkan bahan organik tanah di lahan pertanian akan selalu terdegradasi akibat berbagai praktik pengolahan tanah. Lahan dengan vegetasi rumput (misalnya *P. conjugatum*) juga menunjukkan kandungan bahan organik yang lebih tinggi daripada tanah dengan vegetasi alami (Salam dkk., 2001) (**Tabel 3.7**). Secara umum, praktik olah tanah juga memengaruhi kandungan bahan organik tanah, umumnya olah tanah minimum akan memelihara kandungan bahan organik tanah, sedangkan olah tanah intensif akan secara drastis menurunkan kandungan bahan organik tanah (Deng dan Tabatabai, 1996).



Gambar 6.6. Hubungan antara kecepatan reaksi biokimia dengan C-Organik atau N-Total tanah.

Keberadaan bahan organik tanah sangat berkaitan dengan vegetasi penutup tanah (Pujiyanto dkk.,1983) dan karenanya aktivitas enzim tanah dapat berkaitan

dengan jenis vegetasi yang bertumbuh dan berkembang di atasnya. Beberapa peneliti melaporkan perbedaan aktivitas enzim di dalam tanah dengan vegetasi yang berbeda (Duxbury dan Tate III, 1981; Salam dkk., 1996; 1997c; 1998d). Duxbury dan Tate III (1981) melaporkan bahwa aktivitas fosfatase asam meningkat nyata di tanah bervegetasi rerumputan. Salam dkk. (1998d) juga melaporkan bahwa konversi hutan primer dan sekunder menjadi lahan pertanian secara drastik menurunkan aktivitas enzim tanah. Jha dkk. (1992) juga melaporkan bahwa aktivitas fosfatase lebih tinggi di tanah hutan yang belum terganggu daripada di tanah hutan yang telah mengalami perubahan.

Faktor kedua yang memengaruhi kecepatan reaksi biokimia tanah adalah aktivitas enzim tanah. Dengan semakin banyaknya substrat di dalam tanah, maka kecepatan perombakannya menjadi sangat tergantung pada katalisator yang tersedia, yang bertugas menurunkan energi aktivasi reaksi perombakan kimia. Semakin tinggi aktivitas enzim tanah akan semakin tinggi pula kecepatan reaksi perombakan substrat menjadi produk-produk reaksi. Oleh karena itu, berbagai faktor yang memengaruhi aktivitas enzim tanah akan secara otomatis memengaruhi kecepatan reaksi biokimia tanah.

Faktor ketiga yang memengaruhi kecepatan reaksi biokimia adalah kadar air tanah. Hal ini karena air merupakan reaktan penting dalam reaksi hidrolisis yang terlibat dalam reaksi biokimia tanah. Dalam keadaan kering, reaksi hidrolisis bahan organik tidak terjadi karena salah satu reaktannya absen. Umumnya kecepatan reaksi biokimia akan meningkat dengan meningkatnya kadar air tanah sampai batas tertentu (**Gambar 1.3**) (Salam, 1998a). Baligar dkk. (1988) melaporkan bahwa aktivitas fosfatase tanah atas dan tanah bawah yang disimpan dalam kadar air kapasitas lapang adalah 1.7 sampai 1.9 kali lebih tinggi daripada di dalam tanah kering udara. Aktivitas fosfatase juga dilaporkan lebih tinggi di dalam tanah lembab dengan kadar air sampai dengan 120% (w/w) daripada di dalam tanah kering udara (Salam, 1998a). Klein dan Kothe (1980) juga menunjukkan bahwa aktivitas fosfatase lebih tinggi dalam tanah tanpa olah daripada dalam tanah dengan olah konvensional (dengan pembajakan dan penggaruan), berkaitan erat dengan lebih tingginya kadar air tanah di dalam tanah tanpa olah. Namun demikian, kadar air terlalu tinggi akan berpengaruh negatif dan menurunkan aktivitas enzim tanah karena akan menurunkan aerasi tanah sehingga O_2 kurang tersedia dan aktivitas mikroorganisme tanah terganggu. Kadar air tanah dipengaruhi oleh berbagai faktor lain, di antaranya adalah porositas tanah, curah hujan, jenis vegetasi, kandungan bahan organik tanah, dan evapotranspirasi.

Faktor keempat yang memengaruhi kecepatan perombakan biokimia tanah adalah temperatur tanah (Harrison, 1983; Neal, 1990). Temperatur tanah

berpengaruh terhadap aktivitas enzim tanah sedikitnya melalui dua mekanisme. Pertama melalui pengaruh langsung temperatur tanah terhadap mikroorganisme penghasil enzim. Pada temperatur rendah, populasi dan aktivitas mikroorganisme rendah sehingga produksi dan aktivitas enzim tanah juga rendah. Kedua, temperatur tanah dapat berpengaruh langsung terhadap aktivitas enzim. Kecepatan perombakan biokimia umumnya akan meningkat dengan meningkatnya temperatur tanah sampai temperatur tertentu. Neal (1990) melaporkan bahwa aktivitas fosfatase meningkat dengan meningkatnya temperatur tanah dari -25°C sampai $+5^{\circ}\text{C}$. Pada temperatur lebih tinggi, senyawa enzim akan terdenaturasi, sehingga aktivitasnya menurun. Kondisi ini akan menurunkan kecepatan perombakan biokimia.

Selain itu, aktivitas enzim tertentu juga dipengaruhi oleh pH tanah (Malcolm, 1983; Reddy dkk., 1991; Trasar-Cepeda dkk., 1991; Salam dkk., 1998d; 1998j). Misalnya, aktivitas fosfatase yang sangat tergantung pada pH tanah telah dilaporkan oleh beberapa peneliti dalam bentuk kurva hubungan antara aktivitas fosfatase dengan pH larutan penyangga (Frankenberger dan Johanson, 1982; Garcia dkk., 1993). Secara umum aktivitas fosfatase meningkat dengan meningkatnya pH tanah sampai pada suatu pH optimum saat aktivitasnya maksimum dan kemudian menurun dengan meningkatnya pH tanah (Frankenberger dan Johanson, 1982; Trasar-Cepeda dan Carballas, 1991; Sakai dan Tadano, 1993; Huang dkk., 1995; Salam dkk., 1998d).

Beberapa peneliti juga melaporkan pengaruh berbagai unsur yang larut di dalam air tanah terhadap aktivitas enzim tanah, di antaranya adalah pengaruh P terhadap aktivitas fosfatase. Sebagian besar peneliti melaporkan bahwa penambahan fosfat ke dalam tanah menurunkan aktivitas fosfatase (Juma dan Tabatabai, 1977; Pang dan Kolenko, 1986; Fox dan Comerford, 1992). Ini berkaitan dengan Hukum Aksi Massa, yaitu meningkatnya kelarutan ortofosfat di dalam tanah akibat pelarutan pupuk P dapat mengakibatkan terhambatnya transformasi P organik menjadi P nir-organik (ortofosfat). Kecepatan transformasi P-organik menjadi P nir-organik dapat dinaikkan dengan menurunkan konsentrasi ortofosfat di dalam air tanah.

Selain menghasilkan enzim, kehadiran organisme di dalam tanah juga menghasilkan berbagai jenis asam organik dan senyawa organik lain seperti zat alelopati yang digunakan untuk meningkatkan daya kompetisi tanaman terhadap tumbuhan lain (Sajise, 1980; Sriyani dkk., 1996). Beberapa jenis asam organik yang dihasilkan oleh organisme tanah atau kondisi yang dipengaruhinya disajikan pada **Tabel 6.4.**

Tabel 6.4. Asam organik tanah terkait dengan organisme tanah.

Lokasi	Asam Organik
Rizosfir	CO ₂ , HNO ₃ , Protein, Asam Amino (Aspartik, Glutamik) Vitamin, Polisakarida (Asam Poligalakturonik) Gula dan Asam Gula Asam Fenolik, Asam Alifatik (Oksalik, Malik, Sitrik, Tartarik) Penghambat Pertumbuhan, Senyawa Penarik, dan Senyawa Penolak
Mikroorganisme	Oksalik, Sitrik, Formik, 2-Keto Glukonik, Laktik, Malik, Tartarik Asam Lichen
Berbagai Kondisi	Asam Oksalik dan Sitrik
Kondisi Aerobik	Asam Fenolik
Kondisi Anaerobik	Asam Asetik, Butirik, Formik, Fumarik, Suksinik, dan Laktik
Di bawah Serasah atau Kanopi	Asam Alifatik (Oksalik, Sitrik, Malik); Asam Fenolik (Galik, Vanilik, Hidroksibenzoik)

*Diambil dari Robert dan Berthelin (1986) [~]

Daftar Pertanyaan Utama

1. Tanah merupakan tempat kehidupan yang memiliki berbagai jenis fasilitas hidup. Jelaskan maksud dari pernyataan ini!
2. Jelaskan mengapa pori dan saluran pori merupakan sifat tanah yang sangat penting bagi kehidupan tanah!
3. Jelaskan dampak (positif dan negatif) dari kehidupan di dalam sistem tanah!
4. Jelaskan peranan humus dan bahan organik bagi kehidupan di dalam sistem tanah!
5. Gambarkan Daur C di dalam sistem tanah-tanaman!
6. Gambarkan Daur N di dalam sistem tanah-tanaman!
7. Gambarkan daur S di dalam sistem tanah-tanaman
8. Jelaskan hubungan antara kecepatan dekomposisi bahan organik dengan Nisbah C/N!

9. Jelaskan hubungan antara dekomposisi bahan organik dengan kandungan C-organik, humus, dan populasi mikroorganisme tanah!
10. Jelaskan perbedaan antara Rizosfir dengan daerah perakaran tanaman dan jelaskan sifatnya masing-masing!
11. Jelaskan peranan dekomposer di dalam daur unsur hara di dalam sistem tanah! Jelaskan pula hubungannya dengan produser dan konsumen!
12. Jelaskan bagaimana hubungan antara ukuran dengan jumlah dan peranan makhluk hidup!
13. Jelaskan perbedaan tanggapan antara jamur dan bakteri terhadap perubahan pH tanah!
14. Gambarkan perbedaan jamur, bakteri, aktinomisetes, lichen, dan protozoa!
15. Jelaskan apa yang terjadi dalam proses Fiksasi N, Amonifikasi, Nitrifikasi, Denitrifikasi, dan Volatilisasi. Bakteri apa saja yang terlibat?
16. Apakah yang disebut enzim tanah? Jelaskan asal usulnya!
17. Sebutkan beberapa contoh enzim tanah dan peranannya dalam mengatalisasi reaksi biokimia tanah!
18. Jelaskan reaksi dan peranan enzim Fosfatase di dalam sistem tanah!
19. Bagaimanakah hubungan antara Aktivitas Fosfatase dan pH tanah? Gambarkan dengan sebuah grafik!
20. Jelaskan reaksi dan peranan enzim Arilsulfatase di dalam sistem tanah!
21. Jelaskan reaksi dan peranan enzim Urease di dalam sistem tanah!
22. Sebut dan jelaskan berbagai faktor yang memengaruhi aktivitas enzim tanah!
23. Bagaimana hubungan antara aktivitas enzim tanah dengan C-Organik dan N-total tanah? Mengapa demikian?
24. Bagaimana pengaruh kadar air dan temperatur tanah terhadap aktivitas enzim tanah?
25. Bagaimana hubungan antara aktivitas enzim tanah dengan pH tanah? Jelaskan mengapa demikian!
26. Sebutkan beberapa jenis asam organik yang diproduksi oleh mikroorganisme tanah dan akar tanaman!
27. Bagaimana pengaruh asam organik terhadap sifat-sifat tanah? Jelaskan!

“Tidakkah kamu melihat bahwasannya Kami menurunkan HUJAN dari langit lalu kami hasilkan dengan hujan itu buah-buahan yang beraneka ragam jenisnya; dan di antara gunung-gunung itu ada GARIS-GARIS PUTIH dan MERAH yang beraneka ragam warnanya dan ada (pula) yang HITAM PEKAT” (QS Faathir [35]:27)

Bab VII:

KLASIFIKASI TANAH

7.1 Peranan Klasifikasi Tanah

7.2 Perlunya Horizon Penciri dalam Klasifikasi Tanah

7.3 Sistem Klasifikasi Tanah Modern

7.4 Order Tanah

7.5 Kategori Klasifikasi Lebih Rendah

Daftar Pertanyaan Utama

7.1 Peranan Klasifikasi Tanah

Proses **pelapukan tanah**, yang di dalamnya mengandung berbagai mineral tanah, mengakibatkan sebuah tanah berkembang dari satu jenis tanah ke jenis tanah lainnya. Seperti telah dibahas sebelumnya, jenis tanah yang terbentuk dari sebuah tanah sangat dipengaruhi oleh lima kelompok faktor yang mengatur pembentukan tanah, yaitu: bahan induk tanah, relief, iklim, organisme, dan rentang waktu. Dengan banyaknya faktor pembentukan tanah, dapat kita bayangkan bahwa tanah yang terbentuk dari satu jenis bahan induk akan sangat banyak. Misalnya, lima jenis bahan induk yang berkembang melalui proses pelapukan di lima kemiringan lahan di bawah lima set iklim yang dipengaruhi oleh

Abdul Kadir Salam – 2020

lima jenis organisme yang berbeda dan terbentuk selama lima kurun waktu yang berbeda kemungkinan akan membentuk sebanyak 5 (bahan induk) x 5 (relief) x 5 (iklim) x 5 (organisme) x 5 (waktu) atau kira-kira 3.625 jenis tanah yang berbeda. Bisa dibayangkan berapa jenis tanah yang akan berkembang di seluruh Indonesia atau dunia dengan variasi lebih banyak dari kelima faktor pembentuk tanah tersebut. Di Amerika Serikat saja, sampai tahun 1988 telah diidentifikasi sebanyak 12.000-14.000 jenis tanah (Harpstead dkk., 1988; Buol dkk.,1989). Setiap jenis tanah memiliki seperangkat sifat yang berbeda dengan jenis tanah lainnya. Apakah tidak sulit untuk mempelajari dan mengingat masing-masing jenis tanah ini?

Fakta di atas merangsang para ahli tanah untuk menyusun suatu cara cerdas yang dapat digunakan untuk mengenali sifat-sifat tanah dengan cerdas, cepat dan akurat. Usaha tersebut adalah dengan mengelompokkan berbagai jenis tanah berdasarkan persamaan dan perbedaan ciri dan sifat-sifat antara jenis tanah yang satu dengan jenis tanah yang lainnya. Dengan mengelompokkan berbagai jenis tanah dalam beberapa kelompok dan setiap kelompok terdiri dari beberapa kelompok lebih kecil yang memiliki kesamaan ciri dan sifat tertentu, ahli tanah akan lebih mudah untuk membaca bahkan mengingat sifat-sifat kelompok tanah tertentu. Walaupun demikian pada tingkat yang paling rendah, akan terdapat jutaan jenis tanah. Cara cerdas ini disebut **Klasifikasi Tanah**.

Dengan kehadiran **komputer**, maka pengelompokan berbagai jenis tanah ke dalam kelompok-kelompok tersebut akan sangat dimudahkan. Apa yang dapat kita lakukan adalah mengumpulkan berbagai ciri-ciri dan sifat-sifat setiap jenis tanah dalam *database* komputer dan kita biarkan program komputer untuk mengolahnya secara otomatis dan komputer akan memberitahu kita pengelompokan tanah yang kita teliti. Sudah tentu bahwa program komputer yang cerdas tersebut harus dikembangkan dengan sebuah model konseptual dan model matematika yang akurat seperti yang diinginkan oleh ahli tanah.

7.2 Perlunya Horizon Penciri dalam Klasifikasi Tanah

Untuk memasukkan suatu jenis tanah ke dalam kelompok tanah tertentu kita harus mengetahui horizon penciri tanah. **Horizon Penciri Tanah** menunjukkan seperangkat sifat fisika dan sifat kimia tertentu pada horizon permukaan atau horizon sub-permukaan yang menjadi ciri khas suatu jenis tanah. Sebagian dari sifat-sifat fisika dan sifat-sifat kimia ini dapat ditetapkan langsung di lapang. Sifat-sifat seperti warna tanah dapat ditetapkan di lapang, sedangkan sebagian besar

Abdul Kadir Salam – 2020

sifat-sifat lain seperti pH dan KB hanya dapat ditetapkan atau diukur melalui analisis kimia di laboratorium. Dengan mencocokkan berbagai sifat fisika dan sifat kimia yang diperoleh di lapang dan di laboratorium dan seperangkat persyaratan sifat-sifat suatu horizon penciri, kita dapat menentukan horizon penciri tanah. Horizon penciri, baik Horizon Permukaan (Epipedon) atau pun Horizon Sub-Permukaan, harus diketahui untuk menentukan klasifikasi tanah. Salah satu kunci untuk menentukan epipedon dalam Taksonomi Tanah disajikan pada **Gambar 7.1**.

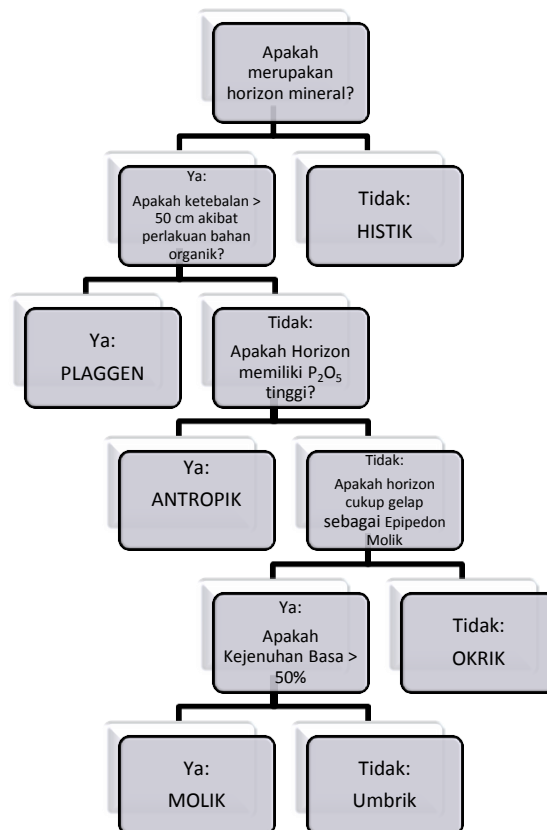
Horizon penciri tanah terbagi menjadi dua kelompok, yaitu Horizon Permukaan (Epipedon) dan Horizon Sub-Permukaan. Epipedon atau Horizon Permukaan mencakup beberapa jenis seperti disajikan pada **Tabel 7.1. Horizon Permukaan (Epipedon)** umumnya memiliki simbol A (mungkin dengan Horizon O di atasnya). Sedangkan **Horizon Sub-Permukaan** secara normal memiliki simbol B dengan diikuti huruf kecil yang menunjukkan jenis perkembangan yang lebih spesifik dari tanah yang bersangkutan (Singer dan Munns, 1987; Harpstead dkk., 1988; Buol dkk., 1989). Contoh penggunaan simbol ini disajikan pada **Tabel 7.2**.

Epipedon Okrik adalah epipedon yang paling banyak ditemui dalam klasifikasi tanah dibandingkan dengan tiga epipedon lain yang banyak digunakan. Menurut berbagai sumber, Okrik diambil dari kata Yunani *Ochros*, yang berarti pucat. Epipedon ini dapat berupa Horizon A yang tipis berwarna pucat, yang menunjukkan kekurangan bahan organik. Horizon ini banyak ditemui di daerah dengan vegetasi alami atau yang beriklim sangat kering, dengan temperatur rata-rata hangat atau dingin. Pengolahan tanah yang memiliki horizon ini mengakibatkan tanah berwarna keabuan atau coklat kekuningan. Penambahan sisa tanaman atau kotoran hewan dapat kembali menghitamkan tanah.

Epipedon Molik merupakan Horizon A yang tebal berwarna coklat sangat tua atau hampir hitam karena tingginya kandungan humus. Molik berasal dari sebuah kata dalam Bahasa Latin *mollus*, yang berarti lembut. Horizon ini biasa ditemui di padang rumput yang mampu membiosiklus ion-ion basa dari subsoil ke permukaan tanah. Ini terjadi karena terbatasnya hujan, yang mengakibatkan tidak terjadinya pencucian basa-basa dan bahkan terjadi perkolasi negatif membawa basa-basa dari lapisan bawah ke permukaan tanah sehingga menaikkan kejenuhan basa tanah. Lapisan tanah ini memiliki struktur granular, yang memungkinkan tanah ini tetap remah walaupun dalam keadaan kering.

Dari sisi penampakan, **Epipedon Umbrik** mirip dengan Epipedon Molik namun horizon ini memiliki kejenuhan basa yang rendah dan tingkat keasaman yang tinggi. Epipedon Umbrik biasanya ditemui di wilayah basah. Umbrik berasal dari kata *umbra*, sebuah kata Latin yang artinya bayangan, yang mendekati warna hitam.

Epipedon Histik memiliki lapisan tebal serasah tanaman (20-40 cm) namun kita tidak dapat mengelompokkannya ke dalam tanah organik. Histik berasal dari kata *histose* dari Bahasa Yunani yang berarti jaringan. Horizon ini berbeda dengan Horizon O, yang memiliki lapisan tipis dari serasah tanaman. Horizon ini biasanya berkembang dengan baik di lahan basah, yang secara periodik terjenuhi oleh air selama beberapa hari atau beberapa pekan per tahun.



Gambar 7.1. Kunci untuk menentukan epipedon dalam Taksonomi Tanah (Singer dan Munns, 1987)

Tabel 7.1. Horizon Permukaan dan Horizon Sub-Permukaan yang umum ditemui di lapangan*.

No.	Horizon Penciri	Keterangan
Horizon Permukaan (Epipedon):		
1	Okrik	Topsoil tipis atau berwarna pucat
2	Molik	Topsoil tebal, berwarna gelap, netral sampai alkali, subur
3	Umbrik	Topsoil tebal berwarna gelap, asam, tidak subur
4	Histik	Lapisan bahan organik tebal di atas tanah mineral
Horizon Sub-Permukaan:		
1	Kambik	Perkembangan tanah sedang
2	Argilik	Kaya liat hasil cucian dari topsoil
3	Spodik	Kaya koloid humus, Al, dan biasanya Fe cucian dari topsoil
4	Albik	Berwarna putih – pucat
5	Oksik	Sangat lapuk, tidak subur, liat sesquioksida tinggi, biasanya berwarna kemerahan

*Singer dan Munns (1987); Harpstead dkk. (1988); Buol dkk. (1989)

Horizon Kambik terkait dengan proses pencucian berbagai bahan dari lapisan atas (A) ke lapisan bawah (B). Horizon Kambik menunjukkan tingkat pelapukan masih sedang dan endapan bahan cucian dari lapisan atas masih sedikit. Untuk memenuhi persyaratan Kambik, sebuah horizon harus tidak terlalu berpasir dan menunjukkan sedikit perubahan oleh proses pelapukan. Ini ditunjukkan oleh warna, struktur, dan pengangkutan komponen terlarut. Kambik berasal dari kata Latin *cambiare* yang artinya mengubah.

Horizon Argilik mengandung liat dalam jumlah yang lebih besar daripada Horizon A dan juga biasanya lebih besar daripada di Horizon C. Horizon seperti ini banyak dijumpai hampir di seluruh wilayah hutan basah dan juga di wilayah lahan kering. Sebagian liat di horizon ini berasal dari Horizon A dan sebagian lagi tentunya dibentuk di Horizon B oleh pelapukan mineral primer menjadi mineral sekunder atau mineral liat. Tanda (t) di Horizon B_t berasal dari sebuah kata Latin *tone*, yang artinya liat. Kata Argilik sebagai nama horizon ini berasal dari *argillus*,

Abdul Kadir Salam – 2020

sebuah kata Latin, yang berarti liat putih. Horizon ini bermanfaat bagi tanaman karena dapat mengikat air dan unsur hara di daerah perakaran.

Tabel 7.2. Contoh horizon tanah*.

Lapisan Tanah	Simbol		Sifat
	Umum	Khusus	
Solum:			
• Lapisan Organik	O		
→ Lapisan Daun		O _i	Serat tanaman masih dikenali
→ Humus		O _a	Saprofit telah mendekomposisi sisa tanaman
• Topsoil	A		
→ Kaya humus		A _p	Lapisan olah berwarna hitam
• Subsoil			
→ Lapisan Tercuci	E		Warna pucat akibat tercucinya partikel halus (Eluviasi)
→ Zone Akumulasi	B	B _t	Liat terkonsentrasi, berasal dari topsoil
Bahan Induk	C		Perubahan oleh pembentukan tanah masih kecil
Cadas	R		Lapisan Batuan

*Diadaptasi dari Harpstead dkk. (1988)

Horizon Argilik terdiri dari dua jenis: Horizon Natrik dan Horizon Kandik. **Horizon Natrik** terbentuk karena terjadinya dispersi liat akibat tingginya Na di dalam tanah. Dispersi liat mengakibatkan terjadinya penyumbatan pori tanah sehingga menurunkan perkolasi air di dalam tanah. **Horizon Kandik** memiliki liat beraktivitas rendah (Kaolinit) sehingga tidak mengikat unsur hara dengan baik.

Di wilayah tropika yang basah dan berpasir, subsoil biasanya berwarna coklat kemerahan sampai hitam, disebabkan oleh pelapisan permukaan butiran pasir oleh oksida besi dan aluminium bersama dengan humus. Pelapisan ini dapat terlihat dengan jelas dalam matriks tanah. Lapisan subsoil dengan sifat seperti ini disebut **Horizon Spodik** dan disimbolkan dengan B_{hs}. Notasi (h) menunjukkan humus dan

(s) menunjukkan sesquioksida Fe dan Al. Spodik berasal dari sebuah kata Yunani *spodus*, yang berarti abu hitam. Bila tanah ini diolah, tanah abu-abu muda di atas Horizon E memberikan warna seperti abu di permukaan lahan. Menurut Harpstead dkk. (1988), di bawah lapisan humus yang gelap dan asam Spodosols terdapat horizon putih (**Horizon Albik**) di atas Horizon Spodik yang berwarna coklat tua dengan humus dan/atau sesquioksida melapisi partikel pasir

Horizon Oksik adalah subsoil yang sangat miskin dengan hampir tanpa mineral primer selain kuarsa. Matriks tanah ini terdiri dari kuarsa dan mineral liat yang tahan lapuk berupa kaolinit dan sesquioksida dengan simbol B_0 . Lapisan ini kenampakannya tidak berbeda jelas dengan subsoil lainnya. Seluruh subsoil umumnya secara seragam telah melapuk dan kehilangan sifat batuan aslinya. Horizon ini ditemukan di wilayah tropika dengan pelapukan yang sangat hebat dalam jangka waktu yang lama.

Tanah di wilayah agak kering memiliki **Horizon Kalsik**, yang tersusun dari kalsium karbonat yang tercuci dari lapisan atas. Pada bentukan lahan yang telah tua di wilayah kering, lapisan ini telah mengeras menjadi **Horizon Petrokalsik** (B_{km}). Dinamakan demikian karena keras seperti batu dan tersusun terutama dari $CaCO_3$.

Selain Horizon Permukaan (Epipedon) dan Horizon Sub-Permukaan yang disajikan pada **Tabel 7.1.**, sering juga ditemukan Fragipan dan Duripan (Singer dan Munns, 1987). **Fragipan** juga dijumpai di wilayah hutan. Horizon ini sangat padat sehingga menghambat penetrasi air dan akar tanaman. Penyusunan yang rapat antara pasir dan debu dan ikatannya yang lemah mengakibatkan horizon ini bersifat rapuh bila kering atau lembab, tetapi tidak demikian bila dalam keadaan basah.

Duripan lebih keras daripada petrokalsik karena penyusunannya mencakup SiO_2 . Horizon ini terdapat di wilayah padang pasir dan wilayah dengan lapisan abu vulkan dengan curah hujan yang sedang. Di wilayah yang hangat dan basah, dengan bahan induk banyak mengandung besi, besi terakumulasi dan mengkristal membentuk lapisan yang disebut **Plintit**, yang berkembang lebih baik di lereng bawah. Plintit mengeras menjadi lapisan **Petroferik** (*iron pan*) bila telah melalui pembasahan dan pengeringan secara teratur.

7.3 Sistem Klasifikasi Tanah Modern

Sistem klasifikasi tanah memungkinkan kita mengelompokkan tanah dalam sebuah sistem sehingga tanah memiliki sebuah nama yang dengannya orang dapat

Abdul Kadir Salam – 2020

dengan mudah dan cepat memahami ciri-ciri dan sifat-sifatnya. Pemahaman ini sangat penting dalam kaitannya dengan penggunaan tanah untuk berbagai kepentingan termasuk dalam bidang pertanian. Salah satu sistem klasifikasi tanah modern yang banyak digunakan dan masih relevan adalah **Sistem Taksonomi Tanah** (*Soil Taxonomy System*) (Hasket, 1995).

Sistem Taksonomi Tanah memiliki enam tingkatan kategori. Kategori tertinggi disebut dengan **Order**. Pada tingkat klasifikasi ini tanah dikelompokkan menjadi 11 order. Kesebelas order tersebut berserta horizon pencirinya disajikan pada **Tabel 7.3**. Kategori di bawahnya adalah **Suborder**, **Great group**, **Subgroup**, **Famili**, dan **Seri**. Pengelompokan ini secara umum disajikan pada **Gambar 7.2**.

7.4 Order Tanah

a. Entisols

Entisols adalah Tanah Primitif (Harpstead dkk., 1988). Tanah-tanah dalam order ini merupakan tanah-tanah yang baru berkembang, memiliki Horizon A dan Horizon C. Perkembangan demikian dapat disebabkan oleh bahan induk yang tahan terhadap pelapukan atau karena permukaan tanah muda sebagai akibat erosi yang berjalan ajeg atau timbunan material baru yang terbawa oleh angin, air, atau agen pembawa lainnya seperti deposisi pasir ledakan gunung berapi. Lapisan atas tanah juga dapat terbuang karena beberapa sebab sehingga material baru di bawahnya muncul dan mengakibatkan tanah tetap muda. Proses kebalikannya juga mengakibatkan tanah aluvial atau lahan basah tetap muda. Bahan baru ditambahkan lapis demi lapis ketika air banjir melewati tanah ini.

b. Inceptisols

Inceptisols merupakan Tanah Muda (Harpstead dkk., 1988). Tanah ini menunjukkan perkembangan lebih lanjut dari Entisols, namun dibandingkan dengan tanah lainnya, tanah ini masih relatif muda. Tanah ini ditemukan di semua

iklim kecuali di padang pasir. Sebagian besar tanah ini memiliki Epipedon Okrik dan Horizon B Kambik. Lereng gunung umumnya memiliki tanah Inceptisols sebab erosi dan pencucian oleh hujan di daerah ini sangat efektif. Perkembangan tanah juga umumnya terhambat bila tanah tidak mengering secara periodik. Ini merupakan alasan mengapa tanah Inceptisols biasa ditemukan di daerah cekungan.

Tabel 7.3. Nama dan beberapa sifat Order Tanah*

No.	Nama Order	Singkatan untuk Penamaan Tanah	Horizon Diagnostik	Sifat Diagnostik Lain
1	Entisols	Ent	Tidak Ada	Horizon Okrik Biasa
2	Inceptisols	Ept	Kambik	Epipedon Molik Tidak Ada Horizon Argilik Tidak Ada
3	Vertisols	Ert	Tidak Ada	Horizon Okrik Biasa Horizon Argilik Tidak Ada
4	Aridisols	Id	Tidak Ada	Horizon Okrik dan Argilik Mungkin Ada Horizon Oksik dan Spodik Tidak Ada
5	Alfisols	Alf	Argilik	Epipedon Molik, Oksik, dan Spodik Tidak Ada
6	Mollisols	Oll	Epipedon Molik	Horizon Argilik Mungkin Ada Horizon Oksik dan Spodik Tidak Ada
7	Ultisols	Ult	Argilik	Horizon Oksik dan Spodik Tidak Ada
8	Oxisols	Ox	Oksik	Horizon Spodik dan Argilik Tidak Ada
9	Spodosols	Od	Spodik	Horizon Oksik dan Argilik Tidak Ada
10	Histosols	Ist	Tidak ada	Tidak Ada
11	Andisol	And	-	Sifat-sifat tanah Andik Horizon Albik Tidak Ada

*Diambil dari Singer dan Munns (1987); Buol dkk. (1989)

Tanah Mineral (Umum BO < 25%)	Tanah dengan Sedikit Ciri Kurang Lapuk	Horizon A di atas Horizon C	Tidak Didominasi Liat Tipe 2:1	1. Entisols
			Didominasi Liat Tipe 2:1	2. Vertisols
		Horizon A di atas Horizon "B"	Biasanya Basah	3. Inceptisols
			Biasanya Kering	4. Aridisols
	Tanah dengan Horizon B sangat Jelas Pelapukan Sedang	Horizon B kaya Liat (Biasanya Basah)	Horizon A Tebal, Halus, Hitam, Subur	5. Mollisols
			Horizon A Tipis di atas Horizon E, Subur	6. Alfisols
			Horizon A Tipis di atas Horizon E, Tidak Subur	7. Ultisols
		Horizon B kaya BO dan Fe		8. Spodosols
				9. Oxisols
				10. Histosols
Tanah Sangat Lapuk				
Tanah Organik (Umum BO > 25%)				

Gambar 7.2. Kunci klasifikasi tanah untuk kategori *Order* (Harpstead dkk., 1988).

Deposit abu vulkan memiliki wilayah Inceptisols yang sangat luas, termasuk di Indonesia. Ini wajar karena Indonesia memiliki banyak wilayah yang terpengaruh oleh ledakan gunung berapi yang masih aktif. Sebagai contoh adalah tanah

Inceptisols di Gisting Lampung. Tanah ini dicirikan oleh kerapatan jenis yang rendah dan kapasitas pengikatan yang tinggi terhadap fosfat. Sebagian besar tanah ini mengandung bahan organik 10-20%, yang menyebabkan warnanya gelap. Tanah ini juga sangat labil dan sangat mudah melapuk bila dikeluarkan dari wilayah tempat aslinya. Saat ini tanah Inceptisols asal deposit abu vulkanik telah secara khusus dijadikan sebuah order baru (**Order ke-11**), yang disebut **Andisols**. Andisols berasal dari kata bahasa Jepang *Ando*, yang artinya tanah hitam.

c. Aridisols

Aridisols adalah Tanah Padang Pasir (Harpstead dkk., 1988). Tanah ini berkembang di daerah yang kering sepanjang tahun. Namun demikian, di padang pasir tidak hanya terdapat tanah Aridisols; terdapat juga berbagai jenis tanah lain. Di padang pasir, sebagian tanah yang awalnya terbentuk dalam curah hujan sedang masih terpelihara. Sebaliknya, tanah muda yang berpasir dan berkerikil juga ditemui. Sebagian tanah padang pasir bergaram dan hampir semuanya berkapur. Hal ini salah satunya disebabkan oleh perubahan iklim.

Tanah padang pasir sangat tidak stabil sehingga sangat riskan terhadap gangguan dan lambat untuk kembali ke asalnya. Oleh karena itu, penggunaan tanah padang pasir harus dilakukan secara berhati-hati. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa wilayah padang pasir awalnya merupakan padang rumput.

d. Mollisols

Mollisols adalah Tanah Padang Rumput (Harpstead dkk., 1988). Lahan dengan tanah Mollisols merupakan salah satu lahan yang paling produktif, dicirikan oleh hadirnya Epipedon Molik. Sistem perakaran rerumputan mengakibatkan berkembangnya Horizon A yang tebal berwarna hitam karena kaya dengan humus dengan unsur hara dalam jumlah tinggi.

e. Vertisols

Vertisols adalah Tanah Liat Hitam yang Mudah Retak (Harpstead dkk., 1988). Tanah ini ditemukan sangat luas di wilayah beriklim sedang dan wilayah tropika.

Abdul Kadir Salam – 2020

Tidak seperti kebanyakan tanah tropika, tanah ini tidak tercuci berat, bahkan dalam beberapa kasus mengandung kapur. Hal ini disebabkan terutama karena proses pengembangan dan pengerutan liat telah mengangkat bahan berkapur yang masih segar dari Horizon C. Pengangkatan bahan berkapur ini kembali menyuburkan topsoil dengan proses yang lebih cepat daripada pencuciannya oleh air hujan. Selain itu, pengembangan tanah juga menyerap air, tidak membiarkannya lewat melalui pori tanah (perkolasi). Pengembangan tanah juga mengakibatkan terbentuknya gundukan dan lubang. Mikrotopografi seperti ini disebut **Gilgai**.

f. Spodosols

Spodosols merupakan Tanah Hutan Pinus yang Berpasir dan Asam (Harpstead dkk., 1988). Tanah ini berkembang di wilayah dengan hutan pinus. Di bawah lapisan humus yang gelap dan asam terdapat horizon putih (**Horizon Albik**) di atas Horizon Spodik yang berwarna coklat tua dengan humus dan/atau sesquioksida melapisi partikel pasir.

Bila hutan pinus ditebang, walaupun memberikan kayu yang bagus, wilayah ini tidak baik untuk tanaman pertanian dengan perakaran dangkal dan memerlukan basa dalam jumlah yang tinggi. Tanah ini lebih baik digunakan untuk hutan pinus atau hutan wisata.

g. Alfisols

Alfisols adalah Tanah dengan Kejenuhan Basa Tinggi > 35% (Harpstead dkk., 1988; Buol dkk., 1989). Tanah ini berkembang di hutan dengan biosiklus unsur hara yang dapat berjalan secara efektif. Misalnya, Ca diserap akar dan kemudian mencapai daun tanaman dan dikembalikan ke dalam tanah. Bahan induk umumnya mengandung CaCO_3 dengan tekstur halus sampai sedang. Horizon A kaya humus yang tidak tebal sehingga disebut Horizon Okrik. Subsoil mengandung akumulasi liat dengan lapisan liat hitam pada permukaan struktur tanah yang disebut Horizon Argilik. Sifat ini mengakibatkan tanah ini cenderung mengikat air dan unsur hara di bagian atas daerah perakaran secara kuat.

Karena erosi geologis menghambat permukaan tanah untuk terlalu melapuk, di wilayah tropika tanah dapat berkisar dari Inceptisols sampai Alfisols dengan

meningkatkan stabilitas bentang lahan. Alfisols merupakan kelompok tanah yang sangat produktif dan tanggap terhadap pemupukan untuk pertanian. Oleh karena itu, tanah ini cocok untuk pertanian pangan.

h. Ultisols

Ultisols merupakan Tanah Tropika dengan Kejenuhan Basa Rendah < 35% (Harpstead dkk., 1988; Buol dkk., 1989) yang mendominasi sebagian besar tanah-tanah di Indonesia. Tanah ini lebih tua beberapa ribu tahun daripada Alfisols. Biosiklus basa (Ca, Mg, dan K) dalam hutan dengan tanah Ultisols tidak sebaik di tanah Alfisols karena bahan induknya biasanya tidak mengandung CaCO_3 dan pencucian yang terjadi sepanjang tahun membawa serta unsur hara. Di Horizon Argilik terjadi akumulasi liat, namun liat ini lebih terlapuk daripada dalam horizon yang sama pada tanah Alfisols. Dalam Ultisols, pelapukan liat silikat mencapai puncaknya dan akibatnya jumlah kaolinit sangat banyak. Tanah Ultisols yang berdrainase baik berwarna cerah, merah atau kuning, karena adanya besi oksida, sehingga disebut Podzolik Merah Kuning. Tanah Ultisols yang berdrainase buruk berwarna abu-abu.

Bila digunakan untuk pertanian, tanah Ultisols akan segera miskin kecuali bila tanah ini dipupuk secara teratur dan dikelola dengan baik. Namun demikian, dengan pemupukan yang tepat, pertanaman di atas tanah ini dapat dilakukan tiga kali setahun.

i. Oxisols

Oxisols merupakan Tanah Sangat Lapuk (Harpstead dkk., 1988) yang banyak terdapat di Indonesia. Tanah Oxisols umumnya berkembang dari batuan sekunder atau batuan kristalin basa yang sangat rentan terhadap pelapukan. Sebagian besar Oxisols terdapat di wilayah tropika dan memiliki liat tahan lapuk dalam jumlah tinggi, sebagian besar adalah oksida besi dan aluminium amorfus, yang merupakan asal usul nama Oxisols. Salah satu liat silikat yang ditemui dalam tanah ini dalam jumlah banyak adalah kaolinit.

Tanah Oxisols biasanya memiliki struktur granular, yang mengakibatkannya mudah menyerap air dan mudah diolah. Namun demikian, akibatnya unsur hara akan segera cepat hilang karena tidak diikat oleh liat yang telah sangat lapuk.

Abdul Kadir Salam – 2020

j. Histosols

Histosols merupakan Tanah Organik (Harpstead dkk, 1988). Tanah ini merupakan akumulasi bahan organik di lingkungan yang terlalu basah dan/atau dingin bagi bahan organik untuk dapat terdekomposisi secepat produksinya oleh pertumbuhan tanaman. Sebagian Histosols terbentuk di cekungan dangkal yang dipenuhi oleh sisa tanaman dan lebih sering jenuh air. Di Indonesia tanah ini tersebar di P. Sumatera bagian Timur, P. Kalimantan bagian Selatan, dan P. Irian bagian Selatan.

Histosols yang kurang terdekomposisi disebut **Peat**. Tanah ini tidak bagus untuk pertanian walaupun dibarengi dengan drainase yang baik. Histosols yang telah terdekomposisi dengan baik disebut **Muck**. Karena berwarna hitam, umumnya orang mengira *Muck* subur. Namun, dalam kenyataannya tanah ini tidak subur. Pertanian di tanah *Muck* sukar karena memerlukan kehati-hatian dalam mengelola pupuk dan air. Drainase dan pengolahan Histosols mengakibatkan bahan organik dalam tanah ini terdekomposisi dan mengakibatkan penurunan permukaan tanah sekitar 0.3 meter per 10 tahun. Dengan kecepatan seperti ini, lahan pertanian *Muck* dapat menjadi danau dangkal dalam waktu 75 tahun.

Salah satu penyebab tidak suburnya tanah Histosols adalah tingginya kandungan asam fenolat, karena asam ini berpengaruh terhadap penyediaan unsur hara dan pertumbuhan tanaman. Novpriansyah dkk. (2000) melaporkan bahwa konsentrasi asam fenolat tertinggi ditemui dalam gambut saprik pedalaman. Secara umum, kandungan asam fenolat menurun berdasarkan lokasinya: Gambut Pedalaman (*Inland Peat*) > Gambut Transisi (*Transitional Peat*) > Gambut Pasang Surut (*Coastal Peat*); juga menurun berdasarkan kematangannya: saprik > hemik > fibrik. Ketidaksuburan tanah gambut umumnya disebabkan oleh dua hal: (1) tingginya asam fenolat dan asam karboksilat dan (2) rendahnya ketersediaan unsur hara. Tingginya asam-asam fenolat terkait dengan kandungan lignin yang tinggi, sedangkan kandungan asam karboksilat berkaitan dengan kandungan selulosa.

Salah satu Histosols kini ditetapkan sebagai Order ke-12 yaitu **Gelisols**. Gelisols adalah tanah yang berkembang di daerah sangat dingin di bawah titik beku sepanjang tahun seperti Siberia, Alaska, dan Kanada dengan akumulasi bahan organik sangat tinggi di lapisan atas sehingga menyebabkannya berwarna hitam atau coklat tua di atas sebuah lapisan mineral yang dangkal. Gelisols secara kimia tidak subur, terutama miskin Ca dan K, yang sangat mudah tercuci di atas *permafrost*. Keberadaan *permafrost* membatasi penggunaan tanah ini untuk bangunan besar seperti gedung bertingkat karena bangunan dapat turun ketika *permafrost* mencair.

Abdul Kadir Salam – 2020

7.5 Kategori Klasifikasi Lebih Rendah

Keenam kategori klasifikasi tanah dalam Sistem Taksonomi Tanah untuk padang rumput yang berwarna hitam di wilayah iklim sedang yang berkembang dari bahan induk berpasir disajikan sebagai contoh pada **Gambar 7.3**. (Harpstead dkk., 1988). **Tipe Tanah** menunjukkan tekstur permukaan tanah. **Fase Tanah** menunjukkan sifat tanah yang memengaruhi penggunaan lahan: kelerengan, penutupan oleh bebatuan, kelembaban, salinitas, dan seterusnya. Kategori tipe dan fase tidak dinomori karena dianggap tidak penting dalam klasifikasi tanah dibandingkan dengan keenam kategori dalam Sistem Taksonomi Tanah. Namun demikian, kategori tipe dan fase penting untuk perencanaan penggunaan lahan. Nama seri tanah pada **Gambar 7.3** adalah Burkhardt, nama sebuah desa dekat jenis tanah ini pertama kali dideskripsikan sebagai tanah padang rumput di lahan yang hampir datar. Seperti terlihat pada gambar tersebut, penamaan tanah seperti ini dapat mengungkap banyak informasi tentang sifat tanah namun dengan notasi yang sangat singkat.

a. Suborder

Untuk menamai kategori suborder digunakan sebuah suku kata dari nama order dan sebuah suku kata lain di depannya untuk memberikan informasi penting lainnya tentang tanah yang bersangkutan. Beberapa kata dan suku kata yang digunakan untuk menamai Suborder dan *Great Group* disajikan pada **Tabel 7.4**.

Suku kata di atas umumnya menunjukkan, misalnya, kondisi kelembaban dan sifat khusus bahan induk atau, seperti dalam Histosols, menunjukkan tingkat dekomposisi bahan organik. Misalnya:

- Alb dari kata *albus* (Latin) yang berarti putih;
- Aqu dari kata *aqua* (Latin) yang berarti air;
- Ar dari kata *arare* (Latin) yang berarti mengolah;
- Arg dari kata *argilla* (Latin) yang berarti liat putih;
- Ferr dari kata *ferrum* (Latin) yang berarti besi;
- Fibr dari kata *fibra* (Latin) yang berarti serabut;
- Fluv dari kata *fluvius* (Latin) yang berarti sungai;
- Fol dari kata *folia* (Latin) yang berarti daun;
- Hum dari kata *humus* (Latin) yang berarti humus;

<i>Sand, Mixed, Mesic</i>	<i>Typic Hapludoll</i>	<i>Berkhardt</i>	<i>Sandy Loam</i>	<i>Nearly Level</i>
	1 – Order: Mollisols 2 – Suborder: Lembab 3 – Great Group: Sederhana 4 – Subgroup: Umum			
5 – Famili: Berpasir, Mineral Campuran, Zone Temperatur Sedang				
		6 – Seri	Tipe	Fase

Gambar 7.3. Tanah dengan nama *Sand, Mixed, Mesic Typic Hapludoll: Berkhardt sandy loam nearly level* (Harpstead dkk., 1988).

- Orth dari kata *orthos* (Yunani) yang berarti benar;
- Psamm dari kata *psammos* (Yunani) yang berarti pasir;
- Trop dari kata *tropikos* (Yunani) yang berarti selamanya panas;
- Ud dari kata *udus* (Latin) yang berarti lembab;
- Ust dari kata *ustus* (Latin) yang berarti terbakar;
- Xer dari kata *xerox* (Yunani) yang berarti kering;

Menggabungkan suku kata di atas dengan suku kata asal order, kita dapat menyusun sebuah kata untuk nama suborder sebagai berikut:

- Tropept = Sebuah Inceptisols dengan regim temperatur Isohipertermik;
- Argid = Sebuah Aridisols dengan horizon Argilik;
- Uduult = Sebuah Ultisols dengan regim kelembaban Udik;
- Psamment = Sebuah Entisols yang sangat berpasir;

Tabel 7.4. Beberapa kata dan suku kata penyusun nama Suborder dan *Great Goup* (Singer dan Munns, 1987).

No.	Suku Kata	Kata Asal	Konotasi Kata
1	Alb	<i>Albus</i> , Putih (L)	Memiliki Horizon Albik
2	Aqu	<i>Aqua</i> , Air (L)	Basah
3	Bor	<i>Boreas</i> , Bagian Utara (G)	Dingin
4	Cry	<i>Kryos</i> , Dingin Es (G)	Sangat Dingin
5	Dur	<i>Duros</i> , Keras (L)	Memiliki Duripan
6	Fluv	<i>Fluvius</i> , Sungai (L)	Bentukan di Dataran Banjir
7	Hapl	<i>Haplous</i> , Sederhana (G)	Perkembangan Horizon Minimum
8	Natr	<i>Natrium</i> (L)	Memiliki Horizon Natrik
9	Ochr	<i>Ochros</i> , Pucat (G)	Memiliki Epipedon Okrik
10	Orth	<i>Orthos</i> , Benar (G)	Umum
11	Pale	<i>Paleos</i> , Tua (G)	Perkembangan Profil Lanjut
12	Psamm	<i>Psammos</i> , Pasir (G)	Memiliki Tekstur Pasir
13	Torr	<i>Torridus</i> , panas dan kering (L)	Kelembaban <i>Torric</i>
14	Ust	<i>Ustus</i> , Terbakar (L)	Kelembaban <i>Ustic</i>
15	Xer	<i>Xeros</i> , kering (G)	Kelembaban <i>Xeric</i>

L = Latin; G = Yunani

Orthod = Sebuah Spodosol sebenarnya (paling umum);

Udoll = Sebuah *Mollisols* di iklim lembab;

Fibrist = Sebuah *Histosols* yang kurang terdekomposisi;

Udox = Sebuah *Oxisol* di iklim lembab;

Aquox = Sebuah *Oxisol* di wilayah basah;

b. *Great Group*

Nama *Great Group* disusun dengan menambahkan sebuah suku kata baru (Tabel 7.4) di depan nama suborder untuk menambah informasi lain tentang sifat tanah. Misalnya,

And dari kata *Ando* (Jepang) yang artinya seperti Ando;
 Arg dari kata *argilla* (Latin) yang artinya liat putih;
 Bor dari kata *boreas* (Yunani) yang artinya bagian utara (dingin);
 Calc sari kara *calcis* (Latin) yang artinya kapur;
 Eutr dari kata *eutrophic* (Yunani) yang artinya subur;
 Ferr dari kata *ferrum* (Latin) yang artinya besi;
 Fluv dari kata *fluvus* (Latin) yang artinya sungai;
 Gibbs dari kata *gibbsite* yang artinya gibsit;
 Gyps dari kata *gypsum* (Latin) artinya gipsum;
 Hapl dari kata *haplous* (Yunani) yang artinya sederhana;
 Hum dari kata *humus* (Latin) yang artinya humus;
 Hydr dari kata *hydro* (Yunani) yang artinya air;
 Natr dari kata *natrium* yang artinya natrium;
 Sal dari kata *sal* (Latin) yang artinya garam;
 Ust dari kata *ustus* (Latin) yang artinya terbakar (iklim kering);
 Verm dari kata *vermes* (Latin) yang artinya cacing;
 Xer dari kata *xerox* (Yunani) yang artinya kering;

Sebuah vokal sering disisipkan di antara suku kata di atas dengan nama *suborder* untuk memudahkan menyebut nama yang tersusun. Misalnya:

Eutropept = Sebuah Tropept dengan KB > 50%;
 Haplorthod = Sebuah Orthod sederhana;
 Borofibrist = Sebuah Fibrist atau *Peat* berserat dari wilayah dingin;
 Hapludult = Sebuah Udult sederhana;
 Argiudol = Sebuah Udoll dengan akumulasi liat di Horizon B;
 Ustipsamment = Sebuah Psamment di wilayah kering;
 Kandiudult = Sebuah Udult yang memiliki Horizon Kandik;
 Hapludox = Sebuah Udox sederhana;
 Plinthaquox = Sebuah Aquox yang memiliki Plintit;

c. *Sub-Group*

Nama sebuah *subgroup* disusun dengan memodifikasi nama *Great Group* menggunakan suatu kata keterangan. Kata keterangan ini menggambarkan kondisi

normal (umum) atau menunjukkan sifat khusus tentang sebuah tanah. Beberapa kata seperti itu adalah sebagai berikut:

- Aquic, yang artinya memiliki sifat basah;
- Alfic, yang artinya cenderung ke Alfisols dengan Horizon Argilik;
- Plinthic, yang artinya memiliki lapisan Plintit;
- Petroferric, yang artinya memiliki lapisan Petroferik;
- Terric, yang artinya memiliki bahan mineral;
- Typic, yang artinya sesuatu yang umum;

Kata keterangan di atas dapat memodifikasi nama *Great Group* menjadi nama *Subgroup* sebagai berikut:

- | | | |
|----------------------|---|--|
| Typic Eutropept | = | Sebuah Inceptisol yang umum dengan KB <50% dan terletak pada regim temperatur tanah isohipertermik; |
| Alfic Haplorthod | = | Sebuah Spodosol biasa yang sederhana dan memiliki Horizon Argilik; |
| Typic Hapludult | = | Sebuah Ultisol sederhana yang umum dan terletak pada regim kelembaban Udik; |
| Terric Borofibris | = | Sebuah <i>Peat</i> berserat yang dangkal di atas bahan mineral di wilayah utara (wilayah iklim dingin); |
| Aquic Eutropept | = | Sebuah Inceptisol dengan KB > 50% yang terletak pada regim temperatur tanah Isohipertermik dan regim kelembaban basah; |
| Typic Argiudoll | = | Sebuah Mollisol yang umum dengan Horizon Argilik di wilayah iklim lembab; |
| Aquic Ustipsamment | = | Sebuah Entisol di wilayah iklim kering yang secara musiman agak basah; |
| Plinthic Kandiodult | = | Sebuah Ultisol yang memiliki Horizon Kandik dan lapisan plintit, terletak pada regim kelembaban Udik; |
| Typic Plinthaquox | = | Sebuah Oxisol umum yang memiliki lapisan Plintit di wilayah basah; |
| Petroferric Hapludox | = | Sebuah Oxisol sederhana di wilayah lembab yang memiliki lapisan Petroferik; |

d. Famili dan Seri

Kategori kelima (**Famili**) tidak dinamai dengan suku kata Yunani atau Latin, tetapi dengan istilah deskriptif yang menunjukkan sifat seperti tekstur, mineralogi, dan regim temperatur. Misalnya, sebuah tanah bertekstur halus sangat lapuk dan terletak di bagian selatan Amerika Serikat akan dikelompokkan ke dalam famili “*fine-loamy, kaolinitic, thermic*”.

Kategori keenam (**Seri Tanah**) adalah nama yang diberikan kepada beberapa jenis tanah dengan sifat profil yang sama. Nama ini berasal dari nama kota atau desa tempat tanah tersebut secara resmi pertama kali dideskripsikan. Pada tahun 1988 sebanyak 12.000 – 14.000 jenis tanah telah dideskripsikan di Amerika Serikat (Harpstead dkk., 1988; Buol dkk., 1989) dan lebih banyak lagi di negara lain di seluruh dunia termasuk di Indonesia. Contoh Seri Tanah adalah Fayette, yang dinamai dari nama kota di negara bagian Iowa Amerika Serikat (Harpstead dkk., 1988):

- 1. Order – Alfisols
- 2. Suborder – Udalf
- 3. Great Group – Hapludalf
- 4. Subgroup – Typic Hapludalf
- 5. Famili – *Fine-Loamy, Mixed, Mesic*
- 6. Seri – Fayette
- Tipe – Fayette silt loam
- Fase – Fayette silt loam, nearly level

Contoh tanah di Indonesia yang telah dideskripsikan adalah sebuah tanah di Gedong Aji, Lampung Utara, sebagai berikut (Wiharso dan Yuwono, 1999):

No.	Tingkat Klasifikasi	Lereng Atas	Lereng Tengah	Lereng Bawah
1	Order	Oxisols	Oxisols	Oxisols
2	Suborder	Udox	Udox	Aquox
3	<i>Great Group</i>	Hapludox	Hapludox	Plinthaquox
4	<i>Sub-Group</i>	Petroferric Hapludox	Plinthic Hapludox	Typic Plinthaquox

Abdul Kadir Salam – 2020

Penamaan tanah dengan menggunakan Sistem Taksonomi Tanah di atas memperlihatkan dengan jelas bahwa sifat-sifat tanah dapat dirangkum dalam sebuah nama singkat yang telah disusun sedemikian rupa sehingga akan lebih mudah untuk disajikan dan dibaca (Singer dan Munns, 1987; Harpstead dkk., 1988; Buol dkk., 1989; Wiharso, 1996; 1999; Wiharso dan Yuwono, 1999; Armanto, 2001). Dengan cara penamaan tanah seperti ini, kita dapat berkomunikasi tentang tanah dan sifat-sifatnya secara lebih baik. [~]

Daftar Pertanyaan Utama

1. Jelaskan mengapa kelima faktor pembentukan tanah dapat menciptakan ratusan, ribuan, bahkan jutaan jenis tanah di seluruh dunia!
2. Mengapa diperlukan klasifikasi tanah? Jelaskan!
3. Bagaimana manfaat komputer dalam melakukan dan mengembangkan sistem klasifikasi tanah?
4. Apakah yang disebut Horizon Penciri, apa gunanya? Apa bedanya Horizon Penciri Epipedon dan Horizon Penciri Sub-Permukaan?
5. Jelaskan sifat-sifat Horizon Okrik, Molik, Umbrik, dan Histik!
6. Jelaskan sifat-sifat Horizon Kambik, Argilik, Spodik, Albik, dan Oksik!
7. Jelaskan sifat-sifat Horizon Natrik dan Kandik!
8. Jelaskan sifat-sifat Horizon Spodik dan Oksik!
9. Jelaskan sifat-sifat Horizon Kalsik dan Petrokalsik!
10. Jelaskan sifat-sifat Fragipan dan Duripan!
11. Jelaskan bagaimana peranan Sistem Taksonomi Tanah untuk pengelompokan berbagai jenis tanah!
12. Jelaskan ciri dan sifat-sifat tanah Entisols, Inceptisols, Andisols, dan Aridisols!
13. Jelaskan ciri-ciri dan sifat-sifat tanah Vertisols, Spodosols, dan Alfisols!
14. Jelaskan ciri-ciri dan sifat-sifat tanah Ultisols dan Oxisols!
15. Jelaskan ciri-ciri dan sifat-sifat tanah Andisols!
16. Apakah Gilgai? Apakah Horizon Albik?
17. Apakah persamaan dan perbedaan tanah *Muck* dan *Peat*? Jelaskan perbedaan tanah gambut berdasarkan lokasi dan perkembangannya!
18. Apa yang menyebabkan tanah Histosols tidak bagus untuk pertanian?
19. Apakah yang disebut *Cat Clay*?
20. Buat beberapa contoh nama tanah hipotetik sampai tingkat klasifikasi Sub-Group!

“Tidakkah kamu melihat bahwasannya Kami menurunkan HUJAN dari langit lalu kami hasilkan dengan hujan itu buah-buahan yang beraneka ragam jenisnya; dan di antara gunung-gunung itu ada GARIS-GARIS PUTIH dan MERAH yang beraneka ragam warnanya dan ada (pula) yang HITAM PEKAT” (QS Faathir [35]:27)

Bab VIII: SURVEY TANAH

- 8.1 Peranan dan Manfaat Survey Tanah
 - 8.2 Tahap Persiapan
 - 8.3 Tahap Pelaksanaan
 - 8.4 Tahap Pelaporan
 - 8.5 Kelas Kemampuan Lahan
- Daftar Pertanyaan Utama*

8.1 Peranan dan Manfaat Survey Tanah

Bayangkan ketika kita diminta oleh suatu instansi untuk memberikan sebuah rekomendasi terkait dengan suatu lahan yang sangat luas yang akan digunakan untuk penggunaan tertentu yang bersifat komersial. Kita pasti akan dihadapkan pada banyak pertanyaan dan persoalan yang harus dijawab dan dipecahkan secara akurat. Jawaban akurat harus didasarkan pada suatu analisis ilmiah berdasarkan pada data empirik yang cukup sehingga rekomendasi yang diberikan memiliki keakuratan berdasarkan pada fakta tanah di lapang. Untuk memperoleh fakta akurat di lapang tentu kita harus “datang” dan mencatat seluruh data terkait dengan tanah yang ada di lahan tersebut secara terencana, terstruktur,

Abdul Kadir Salam – 2020

dan teliti. Semakin teliti kita mengambil contoh tanah dan data tanah di lapang akan semakin akurat pula data yang kita dapatkan. Semakin akurat data yang didapatkan, akan semakin akurat kesimpulan dan rekomendasi yang dimunculkan dari data tersebut. Pengamatan dan pengumpulan data di lapang tentunya harus didapatkan dengan suatu cara terstruktur dengan urutan pemikiran yang sistematis. Pengamatan terstruktur di lapang dan analisis di laboratorium untuk memperoleh data-data tanah di lapang serta pengolahan data dan interpretasinya untuk memperoleh kesimpulan dan rekomendasi yang akurat disebut **Survey Tanah**.

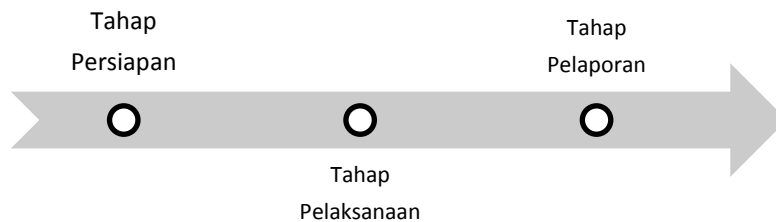
Perlunya Survey Tanah berkaitan dengan kompleksitas fakta tentang tanah di lapang. Seperti telah diungkapkan dalam bagian-bagian sebelumnya, pelapukan batuan di bawah pengaruh dari lima buah faktor pembentukan tanah, yang mencakup bahan induk, relief, iklim, organisme, dan waktu, menghasilkan puluhan atau bahkan ribuan jenis tanah. Sebagai contoh, sampai tahun 1988, di Amerika Serikat telah dideskripsikan sekitar 12.000 – 14.000 jenis tanah (Singer dan Munns, 1987; Harpstead dkk., 1988; Buol dkk., 1989). Bisa dibayangkan berapa jenis tanah yang ada di Indonesia yang terbentuk di bawah variabilitas yang tinggi dari kelima faktor pembentukan tanah tersebut; berapa pula jumlah tanah yang terbentuk di seluruh dunia.

Keadaan di atas menyebabkan lahan yang sangat luas menunjukkan sifat-sifat fisika dan kimia yang berbeda karena jenis tanahnya berbeda. Mungkin saja terjadi, pada satu bidang lahan dengan luasan yang sempit terdapat dua atau tiga jenis tanah yang berbeda karena ada satu atau beberapa faktor pembentukannya yang berbeda. Oleh karena itu, pengamatan dan pengumpulan data di lapang melalui Survey Tanah harus dilakukan. Pengetahuan dan pemahaman terhadap klasifikasi tanah yang berada di dalam sebuah lahan akan memudahkan pembuatan rekomendasi terkait pengelolaannya sehingga dapat memberikan hasil yang optimum. Dengan memahami klasifikasi tanahnya, batas-batas lahan dapat dibuat berdasarkan kelas-kelas tanah, dan sistem pengelolaannya dapat dibuat berdasarkan batas-batas ini.

Untuk melakukan sebuah Survey Tanah yang benar, ada beberapa tahapan yang harus dilalui agar pekerjaan Survey Tanah lebih terarah dan terstruktur sehingga dihasilkan kesimpulan dan rekomendasi yang akurat. Tahapan-tahapan tersebut adalah: (1) Tahap Persiapan, (2) Tahap Pelaksanaan, dan (3) Tahap Pelaporan (**Gambar 8.1**). Masing-masing tahapan harus dilaksanakan dengan cermat agar pelaksanaan dan hasil Survey Tanah berkualitas.

8.2 Tahap Persiapan

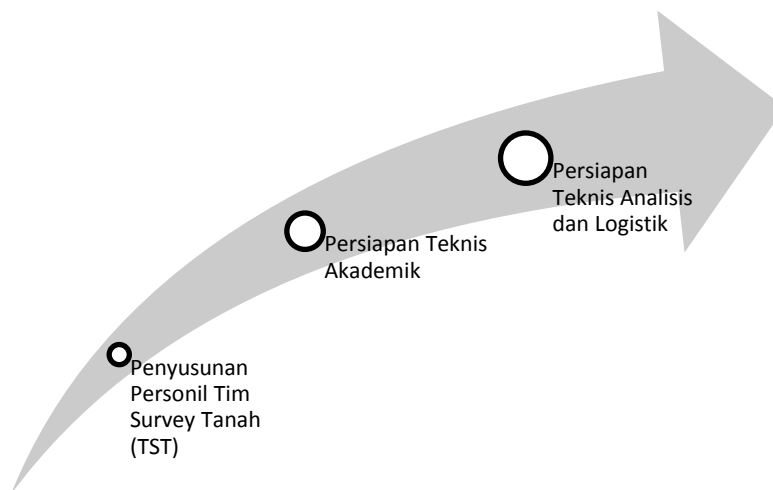
Pekerjaan Survey Tanah di lapang sangat kompleks. Kompleksitas Survey Tanah tidak hanya terletak pada alasan karena kita akan memasuki wilayah yang mungkin sama sekali baru, tetapi juga pada berbagai hal yang sifatnya akademik atau keilmuan, teknis analisis, teknis logistik, dan susunan personil. Kesalahan dalam menghadapi kompleksitas tersebut akan menyebabkan gagalnya sebuah Survey Tanah. Oleh karena itu, semua itu harus dipersiapkan dengan matang (**Gambar 8.2**), sehingga Tahap Pelaksanaan dan Tahap Pelaporan akan berjalan dengan baik dan darinya akan dihasilkan sebuah rekomendasi yang “mumpuni”.



Gambar 8.1. Tahapan-tahapan Survey Tanah.

Untuk mempersiapkan sebuah Survey Tanah, hal pertama yang harus disiapkan adalah sebuah tim yang solid, kompak, dan cerdas dalam kaitannya dengan semangat kebersamaan dan pemahaman keilmuan yang mendasari pelaksanaan survey tersebut. Tim yang akan melaksanakan survey ini disebut Tim Survey Tanah (TST). TST harus mencakup seluruh bidang keahlian yang diperlukan untuk melakukan perencanaan, pelaksanaan, dan penyusunan kesimpulan dan rekomendasi sesuai dengan tujuan survey. Tim ini juga harus dilengkapi dengan teknisi yang memahami analisis tanah dan personil lain yang diperlukan untuk kelancaran tahapan persiapan, pelaksanaan, dan penyusunan laporan survey.

TST harus sebelumnya mengadakan pertemuan akademik membahas tujuan survey dan persiapan-persiapan akademik dan teknis yang diperlukan untuk memuluskan Tahapan Pelaksanaan dan Tahapan Penyusunan Laporan. Persiapan akademik mencakup pengumpulan berbagai bahan dan pustaka yang dapat digunakan untuk melakukan kajian akademik sebelum tahap pelaksanaan dan tahap pelaporan. Kajian akademik dapat dilakukan dengan studi pustaka melalui peta wilayah, peta topografi, peta tanah, data-data sekunder, sejarah lahan, kepustakaan terkait, dan seterusnya. Dari hasil kajian akademik ini dimungkinkan diperoleh seperangkat kesimpulan sementara yang setara dengan hipotesis. Hipotesis ini tentunya harus dibuktikan dengan data-data yang dikumpulkan dalam Tahap Pelaksanaan dan hasilnya digunakan untuk membuat rekomendasi yang diinginkan.



Gambar 8.2. Tahap Persiapan dalam Survey Tanah.

Selain kesimpulan sementara, dari kajian akademik seharusnya telah dibuat pembatasan wilayah survey, kemungkinan-kemungkinan batas-batas jenis tanah

Abdul Kadir Salam – 2020

yang bakal ditemukan, lokasi pembuatan profil tanah, pengambilan contoh tanah dan air; termasuk juga tentang cara dan waktu yang diperlukan untuk mencapai lokasi-lokasi tersebut. Dengan demikian, dari kajian akademik ini sudah diperoleh sebuah metodologi untuk mengumpulkan data lapang walaupun sebagian analisisnya dilakukan di laboratorium. Kajian akademik dan hasilnya harus difahami oleh setiap anggota TST. Oleh karena itu, dapat dipahami bahwa Tahap Persiapan akan memakan waktu yang sangat signifikan; kemungkinan lebih panjang daripada Tahap Pelaksanaan dan Tahap Pelaporan. Kematangan Tahap Persiapan akan menentukan kelancaran tahap-tahap berikutnya.

Dalam Tahap Persiapan juga perlu dilakukan persiapan teknis analisis. Persiapan teknis analisis dijabarkan dari hasil kajian akademik. Ini terkait dengan analisis apa saja yang akan dilakukan, apa saja yang akan didapatkan *on spot* di lapang dan apa saja yang akan dianalisis *out of spot* di laboratorium dengan menggunakan contoh tanah dan contoh air yang diambil dari lapang. Dengan analisis seperti ini, kita akan dapat memerinci peralatan dan bahan apa saja dan jumlahnya berapa yang akan dibawa ke lapang. Dengan demikian tidak ada data yang terlupakan atau tertinggal untuk diambil di lapang atau dianalisis di laboratorium.

Selain itu, dalam Tahap Persiapan juga perlu dilakukan persiapan teknis logistik. Persiapan ini juga didasarkan pada kajian akademik dan teknis analisis. Dari persiapan ini kita mendapatkan data tentang berapa jumlah personil yang akan dimobilisasi termasuk pengelompokannya, berapa kendaraan yang diperlukan untuk mobilitas menuju dan mobilitas di lapang, apa dan berapa perbekalan yang dibawa dan di tempat mana perbekalan tersebut akan atau dapat diperoleh. Dalam persiapan teknis logistik juga disiapkan seluruh peralatan dan bahan menyangkut personil dan teknis analisis yang harus dibawa ke lapang. Persiapan tidak hanya menyangkut mobilisasi keberangkatannya saja tetapi juga menyangkut mobilisasi kepulangan seluruh personil, peralatan dan bahan yang harus dibawa kembali, dan seluruh contoh tanah dan air yang harus dianalisis di laboratorium. Penanganan contoh tanah dan air harus mendapatkan perhatian khusus supaya tidak terjadi kesalahan yang tidak perlu, misalnya terlepas atau tertukarnya label, kerusakan dan kehilangan contoh tanah dan air. Kerusakan contoh tanah dan air mencakup perubahan-perubahan fisika dan kimia tanah yang mungkin terjadi selama pengangkutan sehingga menurunkan aspek representasinya.

Sebelum mobilisasi untuk Tahap Pelaksanaan, termasuk dalam Tahap Persiapan ini, juga perlu dilakukan **Survey Awal**. Survey Awal merupakan sebuah survey kecil dengan memobilisasi tim kecil yang bertujuan memperoleh informasi dan data awal, yang dapat dipergunakan untuk menyempurnakan hasil Tahap

Persiapan. Dalam Survey Awal ini juga ditentukan hal-hal teknis di lapang, misalnya; jalur utama menuju lokasi, fasilitas yang tersedia seperti penginapan atau *base camp*, perizinan, *marker* penanda hal-hal tertentu, tenaga lapang, dan seterusnya.

8.3 Tahap Pelaksanaan

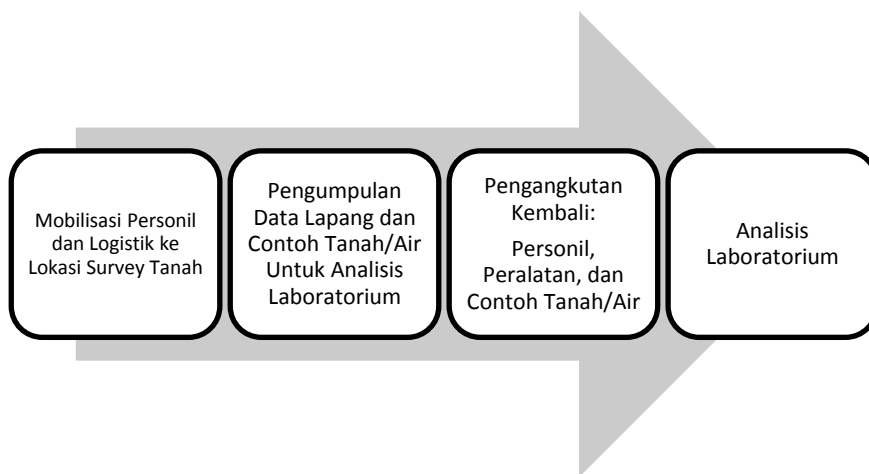
Tahap Pelaksanaan mencakup beberapa kegiatan. Seluruh kegiatan ini telah sebelumnya dibahas dan diputuskan dalam Tahap Persiapan, khususnya kajian akademik. Kegiatan-kegiatan tersebut meliputi: mobilisasi personil, peralatan, dan logistik; pengambilan contoh tanah dari deskripsi profil dan beberapa data pendukung, yaitu data air, data iklim, sejarah, dan lain-lain; pengangkutan personil dan data serta contoh tanah dan air dari lapang; dan analisis laboratorium (**Gambar 8.3**).

Mobilisasi personil, peralatan, dan logistik harus didahului dengan *briefing* singkat dengan mengulang beberapa hasil kajian akademik agar TST dapat mengingat kembali tentang tahapan-tahapan pekerjaan lapang. Kendaraan harus cukup untuk mengangkut personil, peralatan, dan logistik secara aman dan nyaman. Kondisi personil, peralatan, dan logistik harus dijaga sepanjang perjalanan menuju lokasi, keberadaan di lapang, dan kepulangannya. Suasana kesehatan dan hati harus dijaga supaya tidak muncul masalah pada saat pelaksanaan. Ini penting karena pekerjaan di lapang secara fisik sangat berat. Kondisi peralatan juga harus dijaga, supaya dapat tetap berfungsi dengan baik pada saat digunakan di lapang. Logistik juga perlu dijaga karena bisa terjadi hanya sebagian saja atau sama sekali tidak ada makanan dan obat-obatan yang bisa diperoleh di lapang atau dekat wilayah yang disurvei. Ketika sampai di pos masing-masing, setiap sub-tim memeriksa kelengkapan seluruh peralatan dan logistik yang akan digunakan dalam pengambilan data dan contoh tanah dan air di lapang.

Sesuai jadwal, setiap sub-tim mengerjakan tugasnya masing-masing sesuai dengan rencana yang telah ditetapkan dalam rapat persiapan. Hal pertama yang dilakukan adalah: pengambilan contoh tanah (terganggu atau tidak terganggu), baik dari profil yang telah dideskripsi maupun dari pengeboran di beberapa titik bila profil tanah diputuskan tidak dibuat. Lokasi profil tanah harus cukup representatif sesuai dengan rencana yang telah dibuat. Beberapa pengeboran dilakukan di sekitar calon lokasi profil tanah untuk mengetahui homogenitas jenis tanah sebelum profil dibuat dan dideskripsikan. Penetapan ini juga harus dengan

Abdul Kadir Salam – 2020

memperhatikan bentang lahan dan ciri-ciri lain yang terlihat di lapang. Data tentang air dan kecepatan infiltrasi juga perlu dikumpulkan; demikian juga data iklim, vegetasi, dan sejarah lahan bila di sekitar wilayah tersebut dapat dijumpai nara sumber lokal yang dapat dipercaya dan konsisten. Selama di lapang, seluruh data sebaiknya dikumpulkan. Pelabelan contoh tanah dan air harus dibuat sedemikian rupa sehingga terbaca jelas, tidak mudah rusak, tidak mudah hilang, dan tidak mudah tertukar. Seluruh contoh tanah dan air dicatat secara sistematis dan ditangani secara teliti dan hati-hati. Catatan seperti ini sangat berguna sebagai kontrol.



Gambar 8.3. Tahap Pelaksanaan dalam Survey Tanah.

Setelah pengambilan data dan contoh tanah di lapang selesai, mungkin memakan waktu sehari-hari, setiap sub-TST merekapitulasi seluruh data dan contoh tanah dari lapang. Rekapitulasi sangat penting agar tidak ada data dan contoh tanah dan air di lapang yang tercecer. Pada saat perjalanan pulang kembali ke institusi TST, data dan contoh tanah harus mendapatkan 'pengawasan' ketat, dengan maksud agar tidak ada data yang rusak, tertukar, atau hilang. Sub-TST juga harus mengamankan berbagai peralatan dan sisa logistik agar tidak ada yang

tertinggal. Tahap Pelaksanaan harus dilakukan sedemikian rupa sehingga menghasilkan data dan contoh tanah dan air yang bersifat *zero defect*.

Analisis laboratorium merupakan salah satu sub-kegiatan Tahap Pelaksanaan. Analisis laboratorium dilaksanakan karena sebagian besar penetapan dan pengukuran sifat-sifat tanah tidak dapat dilaksanakan di lapang. Analisis laboratorium di antaranya mencakup analisis sifat-sifat fisika dan kimia tanah dan air. Analisis sifat fisika mencakup: tekstur tanah, uji pF, kerapatan isi dan kerapatan partikel, dan lain-lain. Analisis kimia tanah mencakup: pH, KTK, KB, basa-basa, C-Organik, N-Total, Nisbah C/N, P-Tersedia, ketersediaan unsur hara mikro, dan seterusnya sesuai dengan kebutuhan untuk mencapai kesimpulan yang valid.

8.4 Tahap Pelaporan

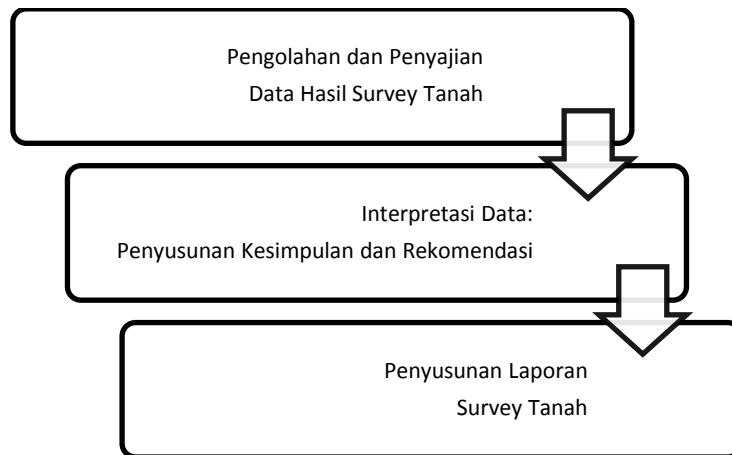
Kesuksesan Tahap Pelaporan sangat tergantung pada ketelitian Tahap Persiapan dan kesuksesan Tahap Pelaksanaan karena Tahap Pelaporan merupakan hasil pengolahan dan interpretasi Tahap Persiapan dan Pelaksanaan. Beberapa sub-kegiatan yang dilaksanakan pada Tahap Pelaporan adalah: Pengolahan, Penyajian, dan Analisis Data; Interpretasi Data; Penyusunan Kesimpulan dan Rekomendasi; dan Penulisan Laporan (**Gambar 8.4**).

Data yang telah diperoleh diolah dengan berbagai program komputer sesuai dengan rencana, disajikan dalam bentuk grafik, diagram, dan/atau tabel. Bentuk sajian data harus dibuat sedemikian rupa sehingga dapat memudahkan pembaca untuk melakukan interpretasi data. Korelasi antara berbagai perubahan dapat dihitung dengan program komputer untuk mengetahui keeratan hubungan antara berbagai sifat tanah tertentu. Uji statistika lainnya juga dapat digunakan untuk mengevaluasi kevalidan interpretasi data. Sajian data sebisanya didiskusikan dalam rapat TST untuk mendapatkan masukan sehingga tampilan dan substansinya lebih baik.

Berdasarkan berbagai sajian data, TST melakukan interpretasi data. Berbagai fakta lapang dan laboratorium serta hubungan sebab-akibatnya diungkap dan kaitannya dengan tujuan survey didiskusikan secara menyeluruh oleh TST. Dengan diskusi intensif di dalam TST diharapkan akan diperoleh kesimpulan-kesimpulan yang valid. Berdasarkan data-data ini dibuat seperangkat rekomendasi untuk melakukan pengelolaan dari lahan yang disurvei. Dalam diskusi untuk membahas dan menginterpretasi data serta menyimpulkan dan menyusun rekomendasi sangat jelas bahwa TST memegang peranan dan tanggung jawab yang sangat penting.

Abdul Kadir Salam – 2020

Semakin serius, hati-hati, dan menyeluruh diskusinya, akan semakin baik kualitas kesimpulan dan rekomendasi yang dihasilkan.



Gambar 8.4. Tahapan dalam Tahap Pelaporan Survey Tanah.

Sub-kegiatan terakhir dalam Tahap Pelaporan adalah Penyusunan Laporan. Penyusunan laporan harus memenuhi kaidah-kaidah keilmuan serta tata cara penulisan ilmiah yang berlaku. Data harus disajikan apa adanya, tidak ada modifikasi, karena perubahan di satu titik akan merembet ke dalam sistem penghitungan dan penyajian data. Sajian tidak boleh berulang (*redundant*). Pembahasan harus bersifat kritis, dengan meramu berbagai pendapat dan hasil penelitian, sehingga banyak pustaka yang dirujuk. Tatacara penulisan harus baku dengan menggunakan Bahasa Indonesia atau Bahasa Inggris yang baik dan benar. Plagiarisme (penjiplakan) harus dihindari, misalnya *copy* dan *paste* dari laporan lain. Merujuk laporan lain dapat dilakukan sepanjang direfrase dan laporan yang dirujuk tersebut dimasukkan dalam Daftar Pustaka. Penulis harus mengutamakan prinsip *Zero-Defect*, meminimumkan kesalahan dalam berbagai hal. Dalam perbahaasan,

sebisanya Penulis tidak melakukan kesalahan walaupun hanya menulis sebuah kata dengan ejaan yang salah.

8.5 Kelas Kemampuan Lahan

Manfaat hasil survey tanah awalnya berkaitan hanya dengan pertanian. Namun demikian, saat ini hasil survey tanah tidak hanya bermanfaat bagi pertanian tetapi juga dalam menyeleksi spesies tanaman untuk regenerasi dan juga untuk merencanakan operasi pemanenan berdasarkan sebagiannya pada kemampuan dan kerentanan tanah terhadap erosi. Hasil survey tanah juga digunakan dalam bidang apa pun yang memerlukan keputusan tentang penggunaan lahan, tentunya ini termasuk bagi petani dan peternak yang ingin meningkatkan keefisienan produksinya. Penyalur pupuk dapat lebih baik dalam menyediakan pupuk bagi petani melalui pengetahuan tentang tanah yang digunakan oleh petani. Ahli teknik sipil yang membangun jalan, gedung bertingkat, dan lapangan terbang juga dapat memanfaatkan hasil survey tanah untuk perencanaan. Pengembang lahan harus memperhitungkan sifat tanah untuk membangun pondasi, jalan, padang rumput, dan juga sistem septik. Ahli perbankan dan berbagai agen yang meminjamkan dana untuk investasi dapat meningkatkan kualitas keputusannya untuk memberikan pinjaman bila ia mengetahui potensi lahan yang akan digunakan oleh peminjam. Rimbawan juga menggunakan peta tanah dalam menyeleksi spesies tanaman untuk regenerasi dan untuk merencanakan operasi pemanenan berdasarkan sebagiannya pada kemampuan dan kerentanan tanah terhadap erosi. Ahli vegetasi atau ahli gulma juga dapat menggunakan hasil survey tanah untuk melakukan survey penyebaran vegetasi, termasuk invasi gulma nir-lokal di lahan pertanian. Lapangan parkir dan fasilitas rekreasi harus direncanakan berdasarkan kesesuaian tanah untuk menopang manusia dan kendaraan dalam jumlah banyak. Dengan demikian, banyak sekali informasi dari survey tanah yang dapat dimanfaatkan, namun hanya sedikit saja yang telah dituliskan di sini.

Dalam bidang pertanian, hasil survey tanah lebih banyak digunakan untuk menentukan **Kelas Kemampuan Lahan**. Kemampuan lahan dibagi menjadi 8 kelas, masing-masing menunjukkan sifat yang secara garis besar disajikan pada **Tabel 8.1**.

Tabel 8.1. Garis besar sifat Kelas Kemampuan Lahan.

Kelas	Sifat
I	Lahan mudah dikelola untuk produksi tanaman tanpa harus mengatasi kendala yang berarti
2-4	Lahan memiliki kendala yang meningkat bila akan diolah untuk produksi tanaman
5-8	Lahan tidak direkomendasikan untuk produksi tanaman dan Kelas 8 hanya baik untuk wisata dan daerah aliran

*Kemungkinan Sub-Kelas: E = Erosi, W = Kelembaban, S = Tanah (Misalnya dangkal), dan C = Iklim (Misalnya kering)

Kelas Kemampuan Lahan dapat dibagi menjadi beberapa Sub-Kelas Kemampuan Lahan berdasarkan kendala dominan yang dimiliki oleh setiap kelas kemampuan lahan. Masing-masing kelas kemampuan lahan memiliki kendala dominan yang menyebabkan tanah masuk ke dalam sub-kelas tertentu. Kendala yang paling dominan untuk produksi tanaman adalah bahaya erosi, yang didasarkan pada kelerengan. Sebagai contoh adalah Sub-Kelas 1W. Sub-kelas ini menunjukkan bahwa lahan tidak memiliki kendala dan tanahnya datar, namun memerlukan drainase. Tanah dangkal di atas padas dapat tergolong ke dalam Sub-Kelas 6S, dan yang tidak dapat diolah karena terletak di lereng bukit dapat dimasukkan ke dalam Sub-Kelas 3E.

Lahan harus dievaluasi berkaitan dengan beberapa kendalanya untuk menempatkannya dalam kelas dan sub-kelas kemampuan lahan yang tepat. Dengan memperhatikan contoh di atas, kita dapat memahami bagaimana sistem ini diterapkan. [~]

Daftar Pertanyaan Utama

1. Apakah yang disebut Survey Tanah?
2. Mengapa Survey Tanah perlu? Apa manfaatnya dalam bidang pertanian dan dalam bidang lain?
3. Bagaimana pentahapan Survey Tanah?

Abdul Kadir Salam – 2020

4. Apa saja yang harus dipersiapkan pada Tahap Persiapan Survey Tanah? Jelaskan!
5. Mengapa persiapan akademik sangat diperlukan pada Tahap Persiapan Survey Tanah?
6. Mengapa teknis analisis dan teknis logistik harus dilakukan pada Tahap Persiapan?
7. Apakah Survey Awal sebelum pelaksanaan survey perlu dilakukan? Apakah kegunaannya?
8. Bagaimanakah pengumpulan data di lapang dilakukan dalam Survey Tanah? Apakah analisis laboratorium perlu dilaksanakan? Jelaskan!
9. Bagaimana data lapang dan data laboratorium diolah dan disajikan agar mudah untuk dibaca dan diinterpretasi?
10. Bagaimana cara menyusun laporan Survey Tanah yang baik? Jelaskan!
11. Uraikan Kelas-Kelas Kemampuan Lahan!
12. Apakah yang dimaksud dengan sub-kelas kemampuan lahan: 3W, 6S, dan 4E?

“..... Sesungguhnya Allah menurunkan AIR dari langit, diatur-Nya menjadi SUMBER AIR di bumi, kemudian ditumbuhkan-Nya dengan air itu TANAM-TANAMAN yang BERAGAM WARNANYA, lalu menjadi KERING, lalu kamu melihatnya KEKUNING-KUNINGAN, kemudian dijadikan-Nya HANCUR berderai-derai” (QS Az-Zumar [39]:21)

Bab IX:

PENGELOLAAN KESUBURAN TANAH

- 9.1 Tanah Sebagai Gudang Unsur Hara
- 9.2 Unsur Hara dan Nutrisi Tanaman
- 9.3 Bentuk Unsur Hara di dalam Tanah
- 9.4 Faktor yang Memengaruhi Ketersediaan Unsur Hara
- 9.5 Mengukur Ketersediaan Unsur Hara
- 9.6 Pupuk dan Pemupukan
- 9.7 Pembena Tanah
- Daftar Pertanyaan Utama*

9.1 Tanah Sebagai Gudang Unsur Hara

M*en were created out of soils.* Kabar ini adalah suatu kebenaran yang memiliki bukti-bukti yang valid. Seluruh unsur yang menyusun tubuh manusia terdapat di dalam sistem tanah. Unsur hara yang berada di dalam tanah diserap oleh tanaman, tanaman dimakan oleh hewan, tanaman dan hewan lalu dimakan oleh manusia, lalu manusia dapat hidup bertumbuh dan berkembang serta menghasilkan keturunan. Unsur hara berpindah dari tanah, kemudian dari satu makhluk hidup ke makhluk hidup yang lainnya melalui rantai makanan. Akibatnya, tubuh manusia tersusun oleh unsur yang asal usulnya dari

Abdul Kadir Salam – 2020

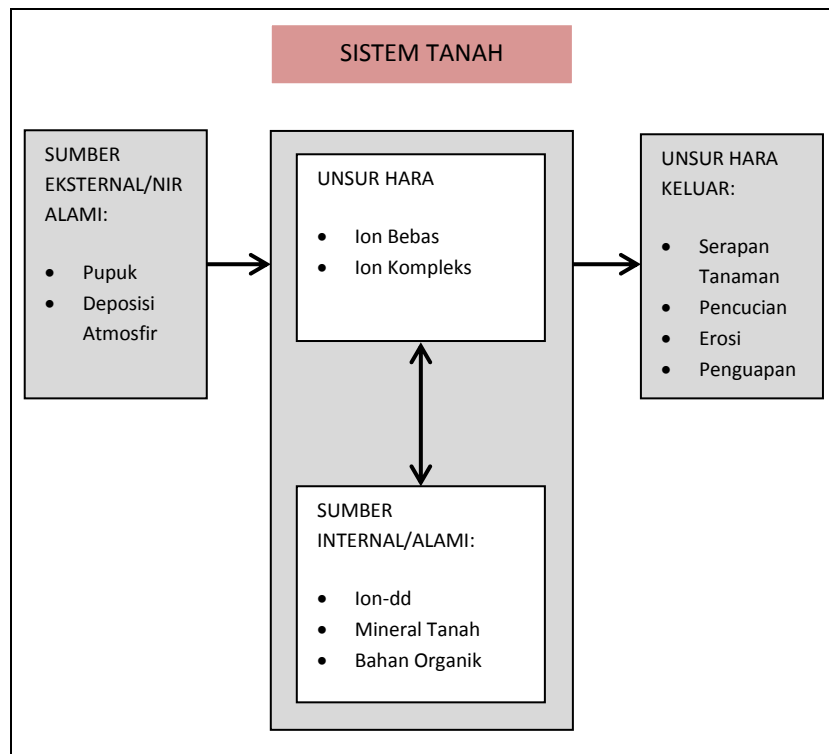
tanah tersebut. Seluruh makhluk hidup, baik tumbuhan, hewan, maupun manusia memerlukan unsur yang asal usulnya dari tanah, walaupun cara mendapatkannya berbeda. Oleh karena itu, dapat dipahami bahwa ternyata tanah berfungsi sebagai gudang unsur hara bagi makhluk hidup.

Namun demikian tidak semua jenis tanah memiliki timbunan unsur hara dalam jumlah yang cukup untuk menopang kehidupan. Memang ada tanah yang subur, yang dapat menopang kebutuhan pertumbuhan dan produksi tanaman yang relatif tinggi, dan karenanya dapat menopang jumlah hewan dan juga akhirnya manusia dalam jumlah yang banyak. Namun ada juga tanah yang kurang subur, sehingga tidak dapat menopang kehidupan yang cukup berarti. Oleh karena itu, secara alami penduduk suatu wilayah biasanya terkonsentrasi di wilayah yang tanahnya subur, yang dapat menjamin kehidupan manusia sampai beberapa generasi. Sistem perladangan berpindah pada jaman dahulu adalah suatu cara penduduk untuk selalu bercocok tanam pada tanah yang subur sehingga kebutuhan makanan seluruh anggota keluarganya dapat terpenuhi. Tanah lama yang kesuburannya telah menurun akibat digunakan secara berulang tanpa tambahan unsur hara baru ditinggalkan, dan tanah yang baru dibuka dan kesuburannya masih tinggi dihuni untuk bercocok tanam. Tanah yang telah lama ditinggalkan, setelah mendapatkan introduksi bahan organik dari berbagai vegetasi pada akhirnya dibuka kembali dan digunakan dengan tingkat kesuburan yang telah kembali meningkat. Kadar unsur hara di dalam tanah ini telah kembali meningkat akibat masukan bahan organik yang merupakan sumber unsur hara.

Unsur hara di dalam tanah jumlahnya sangat terbatas. Oleh karena itu perlu pengelolaan berdasarkan pemahaman yang diperoleh melalui hasil riset. Untuk mengelola unsur hara dengan baik, kita harus memahami berapa jumlah unsur hara di dalam tanah yang tersedia bagi tanaman dari sumber-sumber internal, berapa yang keluar dari sistem tanah, dan berapa yang masuk ke dalam sistem tanah dari sumber-sumber eksternal (**Gambar 9.1**). Pemahaman terhadap kesetimbangan antara faktor-faktor keluaran dan faktor-faktor masukan internal (alami) akan membantu kita dalam menduga seberapa banyak masukan eksternal (nir-alami) dalam bentuk pupuk harus diberikan agar tanah dapat menopang suatu produksi pertanian.

Tanaman menyerap unsur hara dari dalam air tanah. Unsur hara yang diserap oleh tanaman sebagian akan dikonsumsi masuk ke dalam tubuh hewan dan manusia melalui rantai makanan, sebagian lagi akan masuk ke dalam sisa-sisa tanaman dalam bentuk bahan organik. Sebagian hara yang melalui hewan dan manusia juga akan menjadi sisa-sisa hewan dan manusia dalam bentuk bahan organik. Dalam sebuah **sistem tertutup**, seluruh unsur hara yang keluar dari sistem

tanah melalui rantai makanan akan kembali ke dalam tanah dalam bentuk bahan organik. Oleh dekomposer, bahan organik akan didekomposisi sehingga membebaskan unsur hara yang kemudian kembali masuk ke dalam air tanah dan siap untuk kembali diserap oleh akar tanaman dan kembali memasuki rantai makanan.



Gambar 9.1. Neraca hara di dalam sistem tanah-tanaman.

Sebaliknya, dalam **sistem terbuka**, saat sebagian sisa tanaman, hewan, dan manusia tidak kembali ke dalam sistem tanah karena 'diekspor' ke luar sistem tanah, hanya sebagian dari unsur hara yang kembali ke dalam air tanah, sehingga jumlah pengeluaran dari sistem tanah menjadi lebih besar. Selain oleh hasil dekomposisi bahan organik seperti ini, unsur hara di dalam air tanah juga dipasok oleh unsur yang diikat pada koloid tanah, pelapukan mineral, dan deposisi dari

atmosfir. Demikian juga, selain diserap oleh akar tanaman, unsur hara di dalam air juga keluar dari sistem tanah melalui pencucian dan erosi serta penguapan. Seluruh komponen pemasukan dan pengeluaran ini berpengaruh terhadap neraca unsur hara di dalam sistem tanah.

Dengan demikian, jumlah unsur hara di dalam air tanah adalah kesetimbangan antara seperangkat faktor masukan dan faktor keluaran. **Faktor keluaran** adalah: 1. Serapan oleh Akar Tanaman, 2. Pencucian, 3. Erosi, dan 4. Penguapan. **Faktor masukan** adalah: 1. Dekomposisi Bahan Organik, 2. Pembebasan Unsur Hara dari Koloid Tanah, 3. Pelapukan Mineral Tanah, dan 4. Deposisi dari Atmosfir. Dengan memperhatikan faktor-faktor ini, maka sangat diharapkan bahwa jumlah keluaran lebih kecil daripada jumlah masukan alami (Sumber Internal). Dengan demikian, tidak ada masukan eksternal yang diperlukan untuk meningkatkan kesuburan tanah. Tanah yang dapat memperlihatkan neraca seperti ini adalah **tanah subur**, yang memiliki timbunan unsur hara dalam jumlah yang signifikan.

Sebaliknya, dalam kebanyakan **tanah tua** yang sudah tidak subur lagi, neraca ini umumnya bersifat negatif atau jumlah keluaran lebih besar daripada jumlah masukan. Oleh karena itu, ke dalam tanah ini perlu diberikan masukan eksternal dalam bentuk pupuk. Namun demikian, dalam pertimbangan ilmu lingkungan, masukan eksternal harus diberikan dalam jumlah minimum. Selain untuk menekan biaya pembelian unsur hara, pemupukan minimum dapat meminimalkan masukan kontaminan yang terkandung di dalam pupuk.

9.2 Unsur Hara dan Nutrisi Tanaman

Tanaman memerlukan seperangkat **Unsur Hara Esensial**. Unsur hara esensial memiliki beberapa persyaratan. Pertama, unsur hara esensial memiliki satu atau lebih fungsi di dalam metabolisme tanaman. Kedua, kekurangan unsur hara tersebut akan menyebabkan terganggunya metabolisme tanaman sehingga tahapan pertumbuhan dan perkembangan tanaman terganggu dan menunjukkan gejala defisiensi unsur hara. Ketiga, keberadaannya tidak dapat digantikan oleh unsur hara lainnya. Dalam berbagai buku ditunjukkan terdapat sedikitnya 16 buah unsur hara esensial (Tisdale dkk., 1985), yaitu karbon (C), hidrogen (H), oksigen (O), nitrogen (N), fosfor (P), kalium (K), kalsium (Ca), magnesium (Mg), belerang (S), besi (Fe), mangan (Mn), seng (Zn), tembaga (Cu), boron (B), molibdenum (Mo), dan klor (Cl).

Abdul Kadir Salam – 2020

Dengan melihat jumlah kebutuhan tanaman, unsur hara esensial dibagi menjadi dua kelompok besar, yaitu : Unsur Hara Makro dan Unsur Hara Mikro. **Unsur Hara Makro** adalah unsur hara esensial yang diperlukan oleh tanaman dalam jumlah yang besar. Kelompok unsur hara ini mencakup: C, H, O, N, P, K, S, Ca, Mg, dan K. Kelompok unsur hara Makro dibagi lagi menjadi dua kelompok, yaitu **Unsur Hara Makro Utama**, yang mencakup C, H, dan O, dan **Unsur Hara Makro Pelengkap**, yang mencakup: N, P, K, S, Ca, Mg, dan K.

Unsur hara Mikro adalah Unsur Hara Esensial yang diperlukan oleh tanaman dalam jumlah sedikit. Kelompok unsur hara ini mencakup: Fe, Mn, Zn, Cu, B, Mo, dan Cl. Kelompok unsur hara ini dibagi lagi menjadi **Unsur Hara Mikro Kelompok Logam**, yang mencakup: Fe, Mn, Zn, dan Cu, dan **Unsur Hara Mikro Kelompok Nir-Logam**, yang mencakup: B, Mo, dan Cl. Silikon dan Na adalah unsur hara mikro untuk tanaman tertentu. Pengelompokan unsur hara esensial selengkapnya disajikan dalam **Tabel 9.1**.

Tabel 9.1. Pengelompokan unsur hara esensial*.

C	Unsur Hara Makro (Diperlukan dalam Jumlah Banyak)	C	Dari Udara Dan Air	
H		H		
O		O		
N		Pupuk Utama (Diberikan dalam Jumlah Besar)	N	
P			P	
K			K	
S			S	
Ca		Kapur (Kalsit/Dolomit)	Ca	
Mg			Mg	
Fe	Unsur Hara Mikro (Diperlukan dalam Jumlah Sedikit)	Fe	Logam (Pupuk Mikro Via Daun)	
Mn		Mn		
Zn		Zn		
Cu		Cu		
B		Nir-Logam	B	
Mo			Mo	
Cl	Cl			

*Diadaptasi Dari Barber (1984)

Jumlah unsur hara esensial terus berkembang, sesuai dengan perkembangan ilmu pengetahuan. Beberapa laporan terakhir menunjukkan bahwa beberapa unsur lain juga ditemukan merupakan unsur esensial baru. Di antaranya adalah Co, Va, Na, dan Si (Tisdale dkk., 1985). Walaupun keesensialannya masih dipertanyakan, Co berperan penting dalam **Fiksasi N** oleh *Rhizobium* dan dalam pembentukan Vitamin B-12. **Vanadium** diperlukan oleh ganggang hijau dan tidak oleh tanaman tingkat tinggi. Unsur hara ini dapat menyubstitusi Mo, yang berperan dalam fiksasi N oleh *Rhizobium*. **Natrium** dipercaya dapat menggantikan peranan K, namun keesensialannya masih dipertanyakan. **Silikon** diperlukan oleh ganggang, yang merupakan tumbuhan tingkat rendah. Keesensialan unsur hara ini juga masih dipertanyakan.

Masing-masing unsur hara di atas memiliki sumber tersendiri. Karbon, H, dan O dipasok dari CO₂ dan air. Sedangkan sisanya diserap oleh akar tanaman dalam bentuk ion (kation dan anion) dari air tanah. Unsur hara N dalam tanah mulanya berasal dari atmosfer, yang mengandung 78% N₂ dalam bentuk yang tidak tersedia bagi tanaman. Unsur hara ini dapat diambil oleh bakteri dan tanaman polong yang bersimbiosis melalui proses yang disebut **Fiksasi N**, yang mengambil N₂ udara dan mengombinasikannya dengan H₂ membentuk NH₃. NH₃ di dalam tanah dapat dimanfaatkan oleh tanaman setelah mengalami **Amonifikasi** berupa pemuatan oleh ion H⁺ menjadi NH₄⁺. NH₄⁺ akan mengalami nitrifikasi menjadi NO₃⁻, yang merupakan bentuk N yang banyak diserap oleh kebanyakan tanaman (Tisdale dkk., 1985; Singer dan Munns, 1987; Harpstead dkk., 1988).

Unsur hara selain C, H, O, dan N merupakan hasil pelapukan berbagai jenis mineral primer di dalam sistem tanah. Sebagian kecil N juga masuk ke lahan pertanian dengan cara ini. Demikian juga S yang diemisikan dalam bentuk SO₂ dari cerobong asap berbagai pabrik yang menggunakan batu bara. Unsur-unsur ini terbawa angin dan mengendap bersama air hujan di lahan pertanian. Fosfor terutama berasal dari mineral apatit, Mg dari sepiptin dan dolomit. Unsur-unsur hara ini juga dapat masuk melalui air irigasi, yang sebenarnya juga berasal dari mineral tanah.

Setiap jenis unsur hara memiliki satu atau lebih fungsi fisiologis di dalam tanaman. Sebagian unsur hara merupakan unsur hara penyusun senyawa organik di dalam tanaman. Misalnya, di dalam tanaman N akan berubah bentuk menjadi (-N), kemudian (-NH-), dan akhirnya -NH₂ dalam protein. Di dalam tanaman N bersifat fungsional karena merupakan bagian dari protein atau enzim dan tidak bersifat struktural.

Pemberian N dengan takaran berlebihan biasanya menimbulkan beberapa akibat negatif, di antaranya:

Abdul Kadir Salam – 2020

1. Pertumbuhan tanaman lebih progresif,
2. Daun tanaman menjadi hijau tua,
3. Masa vegetatif tanaman lebih panjang, dan
4. Pematangan atau masa generatif tanaman terlambat datang.

Sebaliknya, pemberian N dalam jumlah kurang akan mengakibatkan lebih cepatnya kedatangan masa generatif, khususnya bila dibarengi dengan pemberian P dalam jumlah tinggi. Kekurangan N pada tanaman umumnya akan mengakibatkan:

1. Pertumbuhan tanaman terhambat,
2. Munculnya gejala **Klorosis**, yaitu pemindahan N dari daun tua ke daun yang lebih muda,
3. Daun tanaman menguning, dan
4. Daun tanaman berwarna coklat dan kemudian mati bila kekurangan N berkelanjutan.

Peranan utama P di dalam tanaman adalah sebagai bahan dasar untuk pembentukan asam nukleat. Fosfor merupakan salah satu penyusun Adenosin Trifosfat (ATP), Adenosin Difosfat (ADP), dan Adenosin Monofosfat (AMP). Ketiga senyawa ini berperan penting dalam transfer energi di dalam sistem tanaman. Selain itu, P juga berperan penting dalam fase reproduksi (generatif) tanaman, sehingga kekurangan P dapat memperlambat datangnya fase generatif tanaman dan menghambat pembentukan biji. Berbeda dengan N, unsur hara ini bersifat imobil di dalam tanaman. Oleh karena itu, gejala kekurangan akan terlebih dahulu muncul pada daun tanaman yang lebih muda, karena P tidak dapat diangkut dari daun tua ke daun tanaman yang lebih muda. Namun demikian, kekurangan unsur hara P umumnya dapat menghambat seluruh pertumbuhan tanaman.

Kalium di dalam tanaman bersifat fungsional sebagai katalisator. Oleh karena itu, ion K^+ di dalam tanaman bersifat mobil. Seperti kekurangan N, kekurangan unsur hara ini akan terlebih dahulu muncul pada daun yang lebih tua, baru kemudian berkembang ke bagian tanaman yang lebih muda bila kekurangan K berkelanjutan. Selain mengakibatkan Klorosis pada daun, kekurangan unsur hara K juga dapat mengakibatkan:

1. Tanaman menjadi rentan terhadap hama dan penyakit,
2. Tanaman mudah rebah, misalnya pada padi yang kekurangan K, dan
3. Produksi tanaman menurun.

Kelebihan unsur hara ini biasanya tidak meningkatkan produksi tanaman. Kejadian ini disebut dengan istilah Konsumsi Mewah (*Luxury Consumption*)

Walaupun secara kimia memiliki beberapa kesamaan, di dalam tanaman Ca dan Mg memiliki sifat dan peranan yang berbeda. Di dalam tanaman, Ca bersifat

struktural sedangkan Mg bersifat mobil. Kalsium membentuk Ca-Oksalat dan Ca-pektat, yang merupakan senyawa utama penyusun dinding sel tanaman dan juga sebagai ion pembangkit tekanan turgor di dalam sel tanaman; sedangkan Mg merupakan penyusun klorofil dan berperan dalam aktivasi enzim, pembentukan biji, dan sintesis minyak (bersama-sama dengan S).

Belerang berperan dalam sintesis minyak. Di dalam tanaman, S akan mengalami reduksi membentuk ikatan -S-S- atau gugus -SH dalam protein. Belerang bersifat imobil dan karenanya kekurangan S akan memunculkan gejala kekurangan terlebih dahulu pada bagian tanaman yang muda. Namun demikian, kekurangan S dapat juga mengakibatkan kekerdilan dan Klorosis pada seluruh bagian tanaman.

Unsur hara mikro kelompok logam seperti Fe, Mn, Zn, dan Cu di dalam tanaman umumnya berperan sebagai aktivator enzim. Boron berfungsi dalam translokasi gula β di dalam tanaman, meningkatkan permeabilitas sel tanaman, dan transpirasi. Karena unsur hara ini bersifat imobil, gejala kekurangan unsur hara ini akan muncul pertama kali pada bagian termuda. Kekurangan unsur hara ini akan menghambat pembentukan tepung. Sama seperti halnya unsur mikro kelompok logam, Mo berfungsi sebagai aktivator enzim. Unsur hara ini diperlukan dalam fiksasi N oleh *Rhizobium* yang hidup dalam bintil akar tanaman polong. Kekurangan Cl dapat mengakibatkan pertumbuhan tanaman tertekan dan daunnya berwarna seperti perunggu. Peranan berbagai jenis unsur hara di dalam tanaman disajikan pada **Tabel 9.2**.

9.3 Bentuk Unsur Hara di dalam Tanah

Di dalam tanah, unsur hara berada dalam berbagai bentuk, di antaranya adalah: (a) ion bebas, (b) ion kompleks dan khelat, (c) ion dapat dipertukarkan, (d) mineral endapan (mineral sekunder), dan (e) bagian struktural bahan organik dan bahan nir-organik (mineral primer). Di antara bentuk-bentuk ini, ion bebas dan, dalam derajat tertentu, ion kompleks dan khelat serta ion dapat dipertukarkan adalah yang paling mobil dan berpotensi memengaruhi makhluk hidup karena bentuk-bentuk ini berkaitan langsung dengan serapan oleh akar tanaman dan toksitas unsur tertentu (Salam, 2001; Daoust dkk., 2006).

Tabel 9.2. Peranan beberapa jenis unsur hara di dalam tanaman.

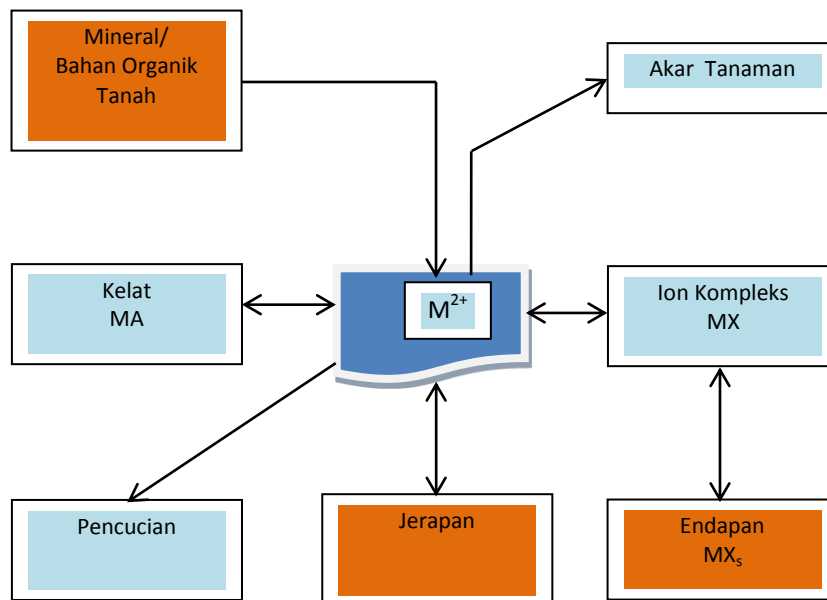
Unsur Hara	Peranan
N	<ul style="list-style-type: none"> - Penyusun protein - Penyusun hijau daun - Pemacu pertumbuhan vegetatif
P	<ul style="list-style-type: none"> - Penyusun protein - Penyusun AMP, ADP, dan ATP - Transfer energi - Pemacu masa generatif/reproduksi
K	<ul style="list-style-type: none"> - Katalisator
Ca	<ul style="list-style-type: none"> - Penyusun Ca-Oksalat dan Ca-Pektat - Pembangkit turgor sel
Mg	<ul style="list-style-type: none"> - Penyusun klorofil - Aktivasi enzim - Pembentukan biji - Sintesis minyak
S	<ul style="list-style-type: none"> - Penyusun protein - Sintesis minyak - Aktivator enzim
Fe, Mn, Zn, Cu	<ul style="list-style-type: none"> - Aktivator enzim
B	<ul style="list-style-type: none"> - Translokasi gula β - Pembentukan tepung - Meningkatkan permeabilitas sel - Meningkatkan transpirasi
Mo	<ul style="list-style-type: none"> - Aktivator enzim - Fiksasi N dari udara

Telah dilaporkan bahwa unsur hara diserap oleh akar tanaman dari dalam air tanah. Seperti telah diungkapkan, unsur hara di dalam air tanah adalah bentuk unsur hara yang paling tersedia dan sangat mudah diserap oleh akar tanaman, khususnya yang berada dalam bentuk ion bebas (M^{2+}). Beberapa pakar kimia tanah telah melaporkan bahwa akumulasi logam berat di dalam jaringan tubuh tanaman berkaitan langsung dengan aktivitas ion bebas logam berat atau spesies logam berat yang tidak berasosiasi dengan spesies apapun juga (Checkai dkk., 1987a;

Abdul Kadir Salam – 2020

1987b). Spesies ion bebas logam berat juga ditunjukkan berhubungan dengan toksisitasnya terhadap makhluk hidup (Allen dkk., 1980) serta berbagai mekanisme yang mengatur kelarutan logam berat di dalam air tanah (Bowman dan O'Connor, 1982; Sanders, 1982; Elliot, 1983; Alloway, 1990b; Salam, 1998).

Tidak seperti ion bebas unsur hara makro seperti Ca^{2+} , Mg^{2+} , NO_3^- , dan SO_4^{2-} , konsentrasi alami ion bebas logam berat di dalam air tanah telah dilaporkan relatif rendah, berada dalam rentang mikromolar untuk Cu dan Zn dan nanomolar untuk Cd (Ma dan Lindsay, 1990; Workman dan Lindsay, 1990; 1993; 1995; El-Falaky dkk., 1991; Salam, 1993). Konsentrasi beberapa jenis ion bebas unsur hara makro di dalam larutan tanah disajikan pada **Tabel 9.3**. Bentuk unsur hara ini di dalam air tanah dipasok oleh beberapa bentuk lain dari unsur hara di dalam sistem tanah (**Gambar 9.2**).



Gambar 9.2. Hubungan antara berbagai bentuk unsur hara di dalam tanah.

Khusus unsur unsur hara yang diserap oleh akar tanaman dalam bentuk kation, konsentrasinya di dalam air tanah akan dipasok melalui kesetimbangan cepat oleh kation dapat dipertukarkan atau unsur hara yang diikat oleh koloid tanah. Dengan menurunnya konsentrasi unsur hara di dalam air tanah karena diserap oleh akar tanaman atau karena pencucian, sebagian kation dapat dipertukarkan segera dibebaskan untuk memenuhi kesetimbangan baru. Sebaliknya, bila konsentrasi unsur hara di dalam air tanah meningkat karena pemupukan atau karena sebab lain, maka sebagian unsur hara di dalam air tanah akan dijerap oleh koloid tanah sampai kesetimbangan baru tercapai.

Tabel 9.3. Konsentrasi beberapa jenis ion bebas di dalam air tanah*.

No.	Ion Bebas	Konsentrasi ($\mu\text{mol L}^{-1}$)
1	NO_3^-	100 – 20,000
2	NH_4^+	100 – 2,000
3	H_2PO_4^- , HPO_4^{2-}	1 - 20
4	K^+	100 – 1,000
5	Ca^{2+}	100 – 5,000
6	Mg^{2+}	100 – 5,000
7	SO_4^{2-}	100 – 10,000

*Helmke dan Corey (1989)

Tidak semua unsur hara di dalam air tanah secara langsung diserap oleh akar tanaman. Akar tanaman hanya menyerap ion bebas, yang berkesetimbangan langsung dengan ion-ion kompleks (Lindsay, 1979; Stumm dan Morgan, 1981). Untuk dapat diserap, ion kompleks juga harus membebaskan ion intinya sehingga menjadi ion bebas. Proses dekompleksasi ini diatur oleh reaksi kesetimbangan. Sebaliknya, dalam keadaan konsentrasi tinggi, sebagian ion bebas juga akan berikatan dengan ligan membentuk ion kompleks. Dengan meningkatnya konsentrasi unsur hara, ion kompleks dapat juga mengendap sehingga ketersediaan unsur hara tersebut melambat. Endapan mineral adalah salah satu

bentuk unsur hara di dalam tanah yang ketersediaannya lambat karena harus sebelumnya melarut membentuk ion kompleks atau ion bebas sebelum dapat diserap oleh akar tanaman. Beberapa ion bebas dan ion-ion kompleks yang terdapat di dalam air tanah disajikan dalam **Tabel 9.4**.

Tabel 9.4. Beberapa contoh ion bebas dan ion kompleks yang terdapat di dalam air tanah.

Kation	Tanah Asam	Tanah Alkalin
Na ⁺	Na ⁺	Na ⁺ , NaHCO ₃ ⁰ , NaSO ₄ ⁻
K ⁺	K ⁺	K ⁺ , KSO ₄ ⁻
Mg ²⁺	Mg ²⁺ , MgSO ₄ ⁰ , Org* (Misal Cu-Fulvik)	Mg ²⁺ , MgSO ₄ ⁰ , MgCO ₃ ⁰
Fe ²⁺	Fe ²⁺ , FeSO ₄ ⁰ , FeH ₂ PO ₄ ⁺	FeCO ₃ ⁰ , Fe ²⁺ , FeHCO ₃ ⁺ , FeSO ₄ ⁰
Cu ²⁺	Org*, Cu ²⁺	CuCO ₃ ⁰ , Org*, CuB(OH) ₄ ⁺ , CuB[(OH) ₄] ₄ ⁰
Ca ²⁺	Ca ²⁺ , CaSO ₄ ⁰ , Org*	Ca ²⁺ , CaSO ₄ ⁰ , CaHCO ₃ ⁺
Cr ²⁺	CrO ₄ ²⁻	CrO ₄ ²⁻
Cd ²⁺	Cd ²⁺ , CdSO ₄ ⁰ , CdCl ⁺	Cd ²⁺ , CdCl ⁺ , CdSO ₄ ⁰ , CdHCO ₃ ⁺
Si ⁴⁺	Si(OH) ₄ ⁰	Si(OH) ₄ ⁰

* Diambil dari Sposito (1989)

Perbandingan konsentrasi antara ion bebas dan ion kompleks sangat beragam karena afinitas ion unsur hara terhadap ligan sangat berbeda. Konsentrasi ion bebas dan ion kompleks beberapa jenis unsur hara disajikan pada **Tabel 9.5**. Terlihat bahwa konsentrasi ion bebas kation-kation basa Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, dan K⁺ adalah sekitar 70 – 90% dari seluruh ion yang larut di dalam air tanah. Konsentrasi ion bebas Zn²⁺ sekitar 40% dari Zn total. Tembaga menunjukkan afinitas yang

Abdul Kadir Salam – 2020

sangat tinggi terhadap ligan; hanya 2% dari total Cu larut berada dalam bentuk ion bebas Cu^{2+} (Ellis dan Knezek, 1982).

Bentuk unsur hara nir-organik yang paling lambat ketersediaannya di dalam tanah adalah unsur hara struktural di dalam mineral tanah. Unsur hara ini dapat diserap oleh tanaman setelah melalui proses pelapukan dan membebaskan unsur hara dalam bentuk ion bebas. Kecepatan pelapukan mineral tanah sangat beragam tergantung pada berbagai faktor. Sebagian mineral seperti **Olivin** akan sangat cepat sekali melapuk membebaskan unsur hara strukturalnya. Namun demikian, sebagian besar mineral melapuk lambat atau sangat lambat. Di antara mineral ini adalah Feldspars yang banyak terdapat di dalam tanah.

Tabel 9.5. Perbandingan konsentrasi ion bebas dan ion kompleks di dalam air tanah*.

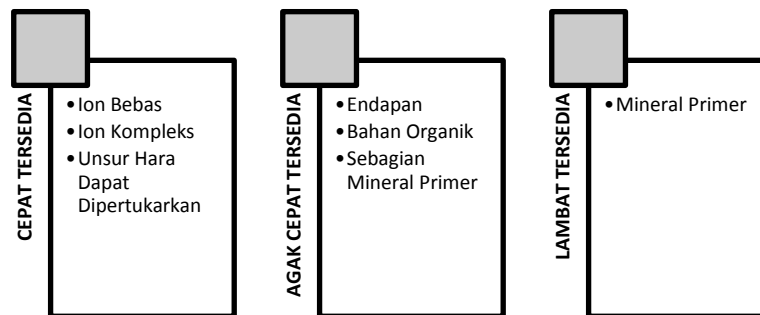
	UNSUR UTAMA	LOGAM BERAT
Bentuk	Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}	Cu^{2+} , Cd^{2+} , Zn^{2+} , Fe^{2+} , Co^{2+}
Komposisi	70 - 90% dari total unsur dalam air tanah	Zn^{2+} 40% Zn_T Cu^{2+} 2% dari Cu_T

*Ellis dan Knezek (1982); Zn_T = total Zn larut; Cu_T = total Cu larut

Selain bentuk-bentuk unsur hara nir-organik (mineral), di dalam tanah juga terdapat unsur hara dalam bentuk organik. Unsur hara ini merupakan bagian struktural senyawa organik, yang dapat diserap oleh tanaman setelah mengalami pembebasan melalui proses dekomposisi yang melibatkan mikroorganisme dan enzim tanah. Sebagian bahan organik, khususnya dengan nisbah C/N rendah akan mengalami dekomposisi dalam waktu relatif cepat; sebagian lagi melapuk lambat atau sangat lambat. Kehadiran enzim tanah yang dihasilkan oleh mikroorganisme, cacing tanah, dan akar tanaman akan mempercepat proses dekomposisi. Pengelompokan bentuk-bentuk unsur hara di dalam tanah dalam kaitannya dengan kecepatan ketersediaannya bagi tanaman disajikan pada **Gambar 9.3**.

Bentuk-bentuk unsur hara pada **Gambar 9.3** sangat jelas digambarkan dengan menggunakan contoh unsur hara K. Pengelompokan bentuk unsur hara K di dalam

tanah disajikan pada **Tabel 9.6**. K-Larut dan K-dd merupakan bentuk K yang paling cepat tersedia di dalam tanah (Salam dan Corey, 1993). Konsentrasi K-Larut lebih rendah daripada K-dd, yang merupakan pemasok K-Larut. K-Larut berkisar antara 1 – 50 ppm atau sekitar 0.4 – 20 kg ha⁻¹ tergantung pada bahan induk dan tingkat kesuburan tanah; sedangkan konsentrasi K-dd sekitar 200 kg ha⁻¹. Konsentrasi terbesar dari K di dalam tanah berada di dalam struktur mineral primer, yaitu sekitar 20.000 – 600.000 kg ha⁻¹. Mineral primer merupakan tumpukan terbesar yang dapat memasok K dalam jangka panjang. Pemanfaatannya oleh tanaman sangat tergantung pada kecepatan proses pelapukan. K-Terfiksasi, khususnya pada mineral liat Tipe 2:1, merupakan sumber K di dalam tanah dalam bentuk Agak Cepat Tersedia. Konsentrasinya di dalam tanah sampai 100 kg ha⁻¹.



Gambar 9.3. Pengelompokan bentuk unsur hara berdasarkan kecepatan ketersediaannya.

9.4 Faktor yang Memengaruhi Ketersediaan Unsur Hara

Sesungguhnya tanah adalah sebuah gudang raksasa yang berisi berbagai jenis unsur hara dalam jumlah yang luar biasa, yang sebenarnya dapat dimanfaatkan tanaman untuk bertumbuh dan berkembang sehingga dapat berproduksi tinggi untuk memenuhi kebutuhan manusia. Namun demikian, seperti telah diungkapkan

sebelumnya, unsur hara di dalam tanah terdiri atas berbagai bentuk yang kecepatan ketersediaannya sangat beragam. Ada bentuk-bentuk yang cepat tersedia, lambat tersedia, dan sangat lambat tersedia, bahkan ada yang tidak tersedia. Sebagian besar unsur hara di dalam tanah berada dalam bentuk yang lambat tersedia (**Tabel 9.6**). Kalium dalam bentuk lambat tersedia (Mineral Primer) sekitar 100 sampai dengan 3000 kali dari yang terdapat di pada kompleks jerapan (K-dd). Dengan demikian, tidak semua unsur hara yang jumlahnya sangat besar tersebut tersedia dan dapat dimanfaatkan oleh tanaman. Untuk dapat dimanfaatkan oleh tanaman unsur hara struktural tersebut harus dibebaskan.

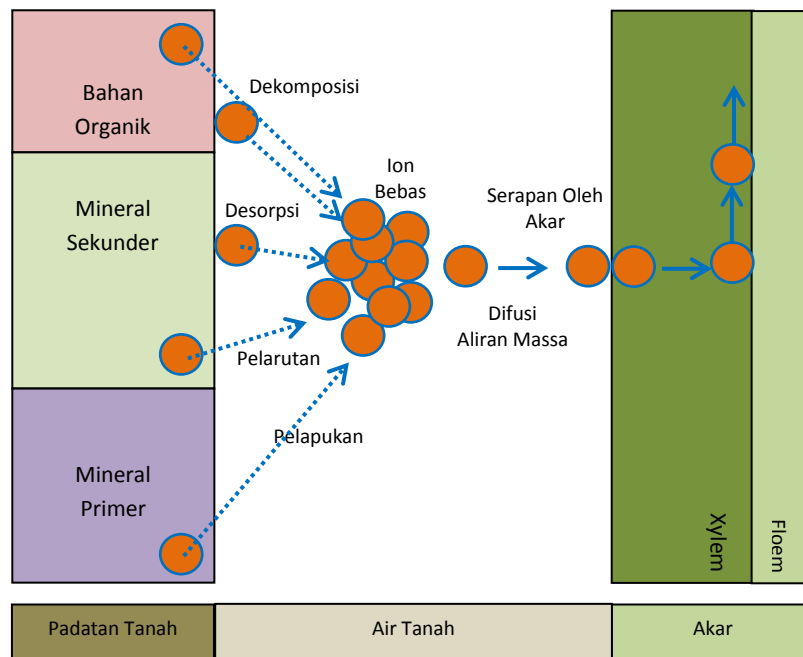
Tabel 9.6. Bentuk dan ketersediaan K di dalam sistem tanah.

	SUMBER	KLASIFIKASI	KADAR
1	Mineral Primer: - K Feldspar - Muskovit - Glaukonit - Biotit	Lambat Tersedia	0.1 – 3% (20.000 – 60.000 kg ha ⁻¹)
2	K-Terfiksasi	Agak Cepat Tersedia	0 → 100 kg ha ⁻¹
3	K-dd	Cepat Tersedia	200 kg ha ⁻¹ (Tanah Subur)
4	K Larut Air	Cepat Tersedia	1–50 ppm (Larutan Tanah) (0.4-20 kg ha ⁻¹)
<p>→ Total beragam tergantung pada bahan induk dan tingkat pelapukan</p> <p>→ Tanah berbahan induk granit > batu kapur</p> <p>→ Tanah Tua (Latosol) < Tanah Muda</p>			

*Diadaptasi dari Corey (1964)

Ketersediaan unsur hara untuk tanaman sangat dipengaruhi oleh berbagai faktor. Faktor-faktor tersebut meliputi: (1) bagaimana unsur hara dibebaskan dari tempatnya terikat, (2) bagaimana unsur tersebut bergerak menuju perakaran tanaman, dan (3) bagaimana unsur hara tersebut diserap oleh akar tanaman. Hubungan ini diperlihatkan pada **Gambar 9.4**. Sebagian unsur hara di dalam tanah berada dalam bentuk tidak tersedia dan harus dibebaskan sebelum akhirnya dapat diserap oleh akar tanaman. Karena jenis dan kekuatan ikatannya berbeda, tidak semua unsur hara dapat dibebaskan dengan mudah dan cepat, dan umumnya dipengaruhi oleh berbagai faktor yang bersifat dinamik, berubah setiap waktu.

Terbebasnya unsur hara dari ikatannya tidak menjamin unsur hara tersebut dapat diserap oleh akar tanaman. Unsur hara yang telah dibebaskan harus berada dekat dengan permukaan akar tanaman sebelum dapat diserap. Ini berarti unsur hara harus bergerak menuju permukaan akar tanaman atau sebaliknya akar tanaman harus tumbuh mendekati massa unsur hara yang telah dibebaskan dari ikatannya. Kedua 'pergerakan' ini juga dipengaruhi oleh berbagai faktor, yang dapat saja menghambat keterserapannya oleh akar tanaman.



Gambar 9.4. Hubungan antara pembebasan, pengangkutan, dan penyerapan unsur hara oleh akar tanaman.

Abdul Kadir Salam – 2020

Umumnya, unsur hara yang telah berdekatan dengan permukaan akar tanaman juga dipengaruhi oleh berbagai hal, tidak semuanya dapat diserap oleh akar tanaman. Penyerapan unsur hara oleh akar tanaman dipengaruhi oleh dua kelompok faktor, yaitu faktor kimia fisika di perbatasan akar tanaman – air tanah dan faktor fisiologi tanaman menyangkut berbagai senyawa yang terlibat di dalam penyerapan dan pengangkutan unsur hara di dalam jaringan tanaman.

a. Pembebasan Unsur dari Padatan Tanah

Pembebasan unsur hara oleh padatan tanah terjadi karena berlakunya hukum kesetimbangan untuk mengkompensasi penurunan konsentrasi unsur hara di dalam air tanah setelah diserap oleh tanaman atau hilang karena proses lain seperti pencucian. Karena unsur hara diserap oleh tanaman dalam bentuk ion bebas, maka produk pembebasan ini diasumsikan akan menghasilkan ion bebas. Walaupun unsur hara diserap oleh akar tanaman dalam bentuk ion bebas, konsentrasi ion bebas sangat terbatas. Sebagian besar unsur hara di dalam tanah terikat dalam bentuk berbagai senyawa kimia. Ion-ion yang terikat ini harus sebelumnya dibebaskan menjadi ion bebas sebelum akhirnya dapat diserap oleh akar tanaman. Berbagai proses pembebasan unsur hara yang terjadi di dalam sistem tanah dan faktor yang memengaruhinya disajikan pada **Tabel 9.7**.

Berbagai ion kompleks terdapat larut di dalam air tanah bersama ion bebas. Bentuk ini adalah yang tercepat dalam memasok ion bebas melalui reaksi kesetimbangan bila konsentrasi ion bebas menurun karena diserap oleh akar tanaman atau karena proses lain. Proses pembebasan (Dekompleksasi) sangat tergantung pada nilai Konstanta Kesetimbangan (K) proses pengompleksan. Semakin tinggi nilai K tersebut akan semakin sulit ion inti dibebaskan menjadi ion bebas. Beberapa ion bebas dan ion kompleks yang terdapat di dalam sistem air tanah disajikan sebelumnya pada **Tabel 9.2** dan **Tabel 9.3**.

Setiap unsur memiliki kecenderungan yang berbeda untuk dapat terkompleks karena ligan memiliki preferensi. Misalnya, ion bebas Zn^{2+} di dalam air tanah umumnya mencakup 40% dari total Zn di dalam air tanah, sedangkan ion bebas Cu^{2+} mencakup hanya 2% dari total Cu yang larut di dalam air tanah (**Tabel 9.5**). Ini menunjukkan bahwa ion Cu^{2+} lebih kuat dikompleks daripada ion Zn^{2+} . Pengompleksan atau pengelatan kation logam berat oleh bahan organik dapat pula

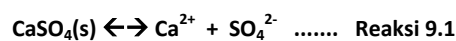
mengendapkan logam berat bila berat molekul bahan tersebut cukup tinggi (Keeney dan Wildung, 1986; Kabata-Pendias dan Pendias, 1992)

Tabel 9.7. Proses pembebasan unsur hara dan faktor-faktor yang memengaruhinya.

No.	Jenis Proses	Sumber Ion Bebas	Faktor Pengontrol Dominan
1	Dekompleksasi	Ion Kompleks	K^*
2	Pelarutan	Endapan	K_{sp}^*
3	Desorpsi	Unsur Dapat Dipertukarkan	K^* , KTK, pH, Preferensi,
4	Pelapukan	Unsur Struktural Mineral	pH, Kadar Air, Struktur Mineral, Komposisi Kimia Mineral
5	Dekomposisi	Unsur Struktural Organik	pH, Kadar Air, Aktivitas Enzim, Temperatur, Nisbah C/N

*K adalah Konstanta Keseimbangan terkait dengan sebuah reaksi kimia, K_{sp} adalah Konstanta Keseimbangan terkait dengan pelarutan senyawa endapan

Selain dalam bentuk ion kompleks, sebagian unsur di dalam tanah juga berada dalam bentuk endapan. Pelarutan endapan di dalam tanah akan sangat tergantung pada Konstanta Keseimbangan (K_{sp}) dan Hasil Kali Kelarutan (HKK), yang merupakan perkalian antara konsentrasi produk-produk pelarutan. Misalnya, dalam reaksi berikut:



Padatan CaSO_4 mengalami pelarutan di dalam air tanah menjadi ion Ca^{2+} dan SO_4^{2-} . Selama HKK, yaitu $[\text{Ca}^{2+}][\text{SO}_4^{2-}]$, nilainya lebih rendah daripada K_{sp} , maka padatan ini akan larut. Namun bila karena suatu sebab HKK tersebut meningkat lebih tinggi

Abdul Kadir Salam – 2020

daripada K_{sp} maka akan terjadi pengendapan CaSO_4 . Karena konsentrasi ion SO_4^{2-} akan turun diserap oleh akar tanaman, maka kemungkinan yang terjadi adalah CaSO_4 akan terus melarut untuk mengimbangi penurunan konsentrasi ion SO_4^{2-} di dalam air tanah. Kecepatan pelarutan padatan tanah sangat tergantung pada jenis mineral endapan, nilai K_{sp} , dan penurunan konsentrasi ion-ion penyusunnya (Bohn dkk., 1985).

Desorpsi ion-ion dapat dipertukarkan juga merupakan proses pemasokan ion bebas dengan kecepatan tinggi. Desorpsi juga merupakan tanggapan terhadap menurunnya konsentrasi ion bebas tertentu di dalam air tanah. Penurunan ini dapat terjadi karena penyerapan ion-ion bebas oleh akar tanaman atau pencucian oleh air perkolasi. Kecepatan proses desorpsi tergantung pada Nilai K dan preferensi koloid tanah terhadap ion (Deret Liotropi). Semakin rendah nilai K akan semakin mudah pula ion tersebut dibebaskan, sehingga untuk membebaskan ion dapat dipertukarkan kita harus menurunkan konsentrasi ion bebas. Karena penyerapan oleh akar tanaman akan menurunkan konsentrasi ion bebas, maka pembebasan ion terikat akan lebih mudah.

Fenomena di atas juga umumnya dipengaruhi juga oleh preferensi koloid tanah terhadap jenis ion bebas. Oleh karena itu, muatan ion, radius ion, dan konsentrasi ion menjadi sangat penting dalam pembebasan ion dapat dipertukarkan menjadi ion bebas. Karena muatan negatif tanah juga menentukan preferensi, maka faktor-faktor yang memengaruhinya juga menjadi penting. Di antara faktor-faktor tersebut adalah KTK, yang menunjukkan jumlah muatan negatif koloid tanah, dan pH, yang berpengaruh terhadap nilai KTK tanah.

Proses pelapukan mineral tanah dan dekomposisi bahan organik membebaskan unsur hara dengan kecepatan lebih lambat. Pelapukan mineral tanah dipengaruhi oleh berbagai faktor, di antaranya adalah: struktur dan komposisi kimia mineral, kadar air, dan pH tanah. Seperti telah diutarakan sebelumnya, mineral dengan kelemahan struktur dan komposisi kimia tertentu, misalnya mengandung Fe dan Mn, yang mudah teroksidasi, akan lebih mudah melapuk dan membebaskan ion bebas. Pelapukan mineral juga memerlukan kehadiran air dan ion H^+ , yang merupakan *attacking agent* dalam proses tersebut. Konsentrasi ion H^+ dicerminkan oleh pH tanah.

Namun demikian, berbeda dengan Dekompleksasi, Pelarutan, dan Desorpsi, pelapukan mineral akan mengeluarkan unsur hara dari cadangan mineral dengan jumlah yang luar biasa banyaknya, jauh melebihi ion dapat-dipertukarkan. Untuk K, jumlah K struktural mencapai 100 – 3000 kali lipat lebih tinggi daripada konsentrasi K-dd. Oleh karena itu, memberdayakan pelapukan mineral-mineral primer di dalam tanah, yang terkandung di dalam fraksi pasir dan fraksi debu, akan

memberikan ion bebas dalam jumlah yang sangat signifikan, sehingga dapat mengurangi masukan unsur hara asal pupuk. Pemanfaatan ini akan lebih nyata pada tanah muda yang masih mengandung mineral-mineral primer dalam jumlah signifikan.

Bahan organik juga merupakan cadangan unsur hara dalam jumlah yang sangat besar. Oleh karena itu, dekomposisi bahan organik akan memberikan ion bebas dalam jumlah yang signifikan. Ini dapat difahami karena sebagian besar unsur hara yang diserap oleh akar tanaman akan diakumulasi di dalam bahan organik. Dekomposisi bahan organik secara umum akan berjalan kira-kira sebagai berikut:



Proses ini melibatkan reaksi redoks (reduksi oksidasi). Dalam reaksi ini, bahan organik (CH_2O) dioksidasi dengan menggunakan O_2 sebagai penerima atau akseptor elektron; unsur C akan mengalami peningkatan bilangan oksidasi dari 0 menjadi +4; sedangkan O_2 berubah bilangan oksidasi dari 0 menjadi -4. Bersamaan dengan proses dekomposisi ini terjadi pembebasan unsur hara dalam bentuk ion bebas. Misalnya, pembebasan HPO_4^{2-} dan SO_4^{2-} melalui dekomposisi P-organik dan S-organik yang masing-masing dikatalisasi oleh enzim fosfatase dan arilsulfatase (**Reaksi 1.2** dan **Reaksi 2.2**). Kedua enzim ini dihasilkan oleh mikroorganisme dan/atau makroorganisme tanah. Aktivitas kedua enzim ini secara umum meningkat dengan meningkatnya kandungan bahan organik tanah, yang merupakan sumber energi bagi makroorganisme dan mikroorganisme tanah.

Reaksi dekomposisi umumnya berjalan lambat. Kecepatan dekomposisi bahan organik dipengaruhi oleh beberapa faktor penting, di antaranya: Nisbah C/N, kadar O_2 , aktivitas enzim, kadar air, temperatur, dan pH tanah. Bahan organik dengan Nisbah C/N rendah akan terdekomposisi lebih cepat. Dekomposisi akan berlangsung dengan baik dengan adanya O_2 yang berfungsi sebagai oksidator (senyawa yang dapat mengakibatkan bahan organik teroksidasi), sehingga menerima elektron. Dengan demikian, pasokan O_2 ke dalam sistem tanah harus berjalan lancar, di antaranya porositas tanah harus dalam keadaan cukup baik sehingga memungkinkan difusi O_2 dari atmosfer ke udara tanah melalui saluran pori tanah berjalan dengan cepat. Oksigen juga diperlukan oleh mikroorganisme tanah untuk bertumbuh dan berkembang termasuk mengeluarkan enzim tanah. Seperti diungkapkan sebelumnya, proses dekomposisi bahan organik berjalan lebih cepat dengan kehadiran enzim. Karena mikroorganisme tanah juga memerlukan air untuk pertumbuhan dan perkembangannya, maka secara tidak langsung kadar air tanah juga akan berpengaruh terhadap kecepatan dekomposisi bahan organik.

Abdul Kadir Salam – 2020

Kombinasi optimum ketersediaan air dan O_2 di dalam tanah akan mempercepat produksi enzim dan dekomposisi bahan organik tanah. Karena kehidupan mikroorganisme tanah sangat dipengaruhi oleh temperatur tanah dan pH tanah, maka kedua faktor ini juga sangat penting dalam pengelolaan proses dekomposisi bahan organik.

Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa unsur hara di dalam tanah terkandung di dalam berbagai cadangan dan dibebaskan menjadi ion bebas dengan berbagai cara. Secara umum bentuk-bentuk cadangan dan cara pembebasan masing-masing unsur hara dari berbagai cadangannya di dalam tanah disajikan pada **Tabel 9.8**. Jumlah unsur hara mikro di dalam berbagai jenis batuan dan tanah disajikan pada **Tabel 9.9**.

b. Pengangkutan Unsur Melalui Air Tanah

Setelah dibebaskan dari berbagai ikatan, ion bebas memasuki air tanah. Seperti telah diutarakan sebelumnya, ion bebas akan mengalami beberapa proses. Pertama, sebagian ion bebas mengalami penyerapan oleh akar tanaman; kedua, ion bebas mengalami pencucian ke lapisan tanah bawah; ketiga, ion bebas mengalami pengikatan kembali oleh berbagai ligan menjadi ion kompleks, ion dapat dipertukarkan, atau endapan.

Untuk dapat diserap oleh akar tanaman, ion bebas harus berada di dekat permukaan serap akar tanaman. Kalau kebetulan ion bebas berada dekat dengan permukaan akar tanaman, maka unsur hara akan segera diserap. Permasalahan muncul manakala ion bebas berada jauh dari permukaan akar tanaman. Ion bebas harus bergerak menuju permukaan akar tanaman atau sebaliknya akar tanaman harus bertumbuh dan berkembang menuju massa ion bebas. Seperti telah diungkapkan sebelumnya, pergerakan ini dilakukan oleh ion unsur hara dengan mekanisme Aliran Massa atau Difusi (**Gambar 4.13** dan **Gambar 4.14**).

c. Penyerapan Unsur Hara oleh Akar Tanaman

Penyerapan ion bebas unsur hara dilakukan dalam dua tahap. Tahap pertama adalah *Outer-Space Absorption* dan tahap kedua adalah *Inner-Space Absorption* (Tisdale dkk., 1985). *Outer-Space Absorption* bersifat fisikokemis, dipengaruhi oleh berbagai sifat dan proses fisika dan kimia tanah. Oleh karena itu, seperti telah

Abdul Kadir Salam – 2020

dibahas sebelumnya, dalam *Outer-Space Absorption* ion bebas unsur hara memiliki sifat: 1. unsur hara berada di dalam air tanah atau di permukaan akar tanaman, 2. dipengaruhi oleh pertukaran kontak, aliran massa, dan/atau difusi, 3. stoikiometrik, dalam pemahaman bahwa unsur hara yang diserap dapat dipertukarkan dengan unsur lain di dalam air tanah, 4. dapat balik (*reversible*), 5. tidak selektif, unsur apa saja dapat diserap; dan 6. tidak metabolik, karena tidak ada senyawa biokimia yang terlibat dalam proses penyerapan.

Tabel 9.8. Cadangan unsur hara tanah dan proses pembebasannya menjadi ion bebas*.

Unsur Hara	Bentuk Cadangan	Proses Pembebasan	Bentuk Larut
N	Bahan Organik NH ₄ ⁺ dalam RAL Mika dan Vermikulit NH ₄ -dd	Dekomposisi	NH ₄ ⁺
		Pelapukan	NH ₄ ⁺
		Pertukaran Kation	NH ₄ ⁺
S	Bahan Organik Sulfida (Mis. FeS) Gypsum (CaSO ₄)	Dekomposisi	S ²⁻ , SO ₄ ²⁻
		Oksidasi	SO ₄ ²⁻
		Pelarutan	SO ₄ ²⁻
P	Bahan Organik Al-P, Fe-P, Ca-P	Dekomposisi	H ₂ PO ₄ ⁻ , HPO ₄ ²⁻
		Pertukaran Ligan	H ₂ PO ₄ ⁻ , HPO ₄ ²⁻
		Pelarutan	H ₂ PO ₄ ⁻ , HPO ₄ ²⁻
K, Ca, Mg	Mineral Silikat (Mis. Feldspar) Karbonat, Sulfat	Pelapukan, Pelarutan	K ⁺ , Ca ²⁺ , Mg ²⁺
		Pelarutan	Ca ²⁺
Fe, Mn, Zn, Cu	Endapan Hidroksida Terjerap Oksida Fe, Al, dan Mn Terkelat Humus Dapat Dipertukarkan	Pelarutan Desorpsi Disosiasi Pertukaran Kation	Kation dan Kelat larut
B, Mo	Terjerap oleh Oksida Fe dan Al serta Mineral Liat	Desorpsi	H ₃ BO ₃ MoO ₄ ²⁻

*Diambil dari Singer dan Munns (1987)

Tabel 9.9. Kandungan unsur hara mikro di dalam berbagai jenis batuan dan tanah.

	Fe	Mn	Cu	Zn	Mo	B
 mg kg ⁻¹					
Kulit Bumi	56,0000	950	55	70	1.5	10
Batuan Beku:						
1. Granit	27,000	400	10	40	2	15
2. Basalt	86,000	1,500	100	100	1	5
Batuan						
Sedimenter:	3,800	1,100	4	20	0.4	20
1. Batu Kapur	9,800	55	30	16	0.2	35
2. Batu Pasir	4,000	850	45	95	2.6	0.2 - 10
3. Batu Lempeng						
Tanah	10 ,0000 - 100,000	20 - 3,000	10 - 80	10 - 300	0.2 - 10	7 - 80

Diambil dari Krauskopf (1982)

Inner-Space Absorption bersifat biokemis dan sangat dipengaruhi oleh faktor-faktor fisiologi tanaman. *Inner Space Absorption* memiliki sifat: 1. akar tanaman aktif, 2. metabolik, karena melibatkan senyawa biokimia yang berfungsi sebagai *carrier* yang dapat mengompleks dan mengangkut unsur hara, 3. spesifik, setiap *carrier* hanya untuk unsur hara tertentu, 4. selektif, tidak menyerap unsur hara selain yang diperlukan tanaman, 5. ion diangkut ke vakuola atau sitoplasma sehingga tidak dapat balik dan tidak dapat dipertukarkan, 6. *carrier* membebaskan unsur hara di sitoplasma dan kembali mengompleks unsur hara lain di permukaan akar tanaman untuk diangkut. Perbedaan antara kedua jenis penyerapan tersebut disajikan sebelumnya pada **Tabel 1.2**.

9.5 Mengukur Ketersediaan Unsur Hara

Produksi tanaman sangat ditentukan oleh ketersediaan unsur hara di dalam tanah. Produksi tanaman akan baik bila seluruh unsur hara yang diperlukan oleh tanaman berada dalam keadaan cukup dan berimbang. Cukup dalam pengertian ketersediaan unsur hara menjamin pemenuhan seluruh kebutuhan tanaman. Berimbang dalam pengertian ketersediaannya sesuai dengan kelompok unsur hara; unsur hara makro tersedia dalam jumlah banyak sedangkan unsur hara mikro tersedia dalam jumlah sedikit, sesuai dengan keperluan tanaman. Namun demikian, tidak semua tanah memenuhi syarat ini. Sebagian besar tanah mengalami kekurangan satu atau lebih unsur hara. Nitrogen adalah unsur hara yang umumnya berada dalam keadaan kurang. Selain itu, P juga merupakan unsur hara yang sering berada dalam keadaan kurang. Kekurangan beberapa jenis unsur hara lain seperti Zn, S, Ca, dll. juga sering ditemui dalam tanah tertentu.

Untuk keperluan perbaikan pertumbuhan dan produksi tanaman, beberapa usaha dapat dilakukan. Namun demikian, langkah pertama yang harus dilakukan terlebih dahulu adalah menentukan jenis dan jumlah unsur hara yang berada dalam keadaan kurang di dalam tanah. Ada beberapa cara untuk melakukan hal ini, yaitu: Deteksi Gejala Kekurangan Unsur Hara, Analisis Jaringan Tanaman, Analisis Kimia Tanah, dan Uji Pertumbuhan Tanaman.

Gejala Kekurangan unsur hara biasanya terlihat dalam bentuk pertumbuhan yang tidak bagus, pemucatan (**Klorosis**) dan penyoklatan jaringan (**Nekrosis**). Gejala yang disebabkan oleh kekurangan N adalah yang paling dapat dimengerti, yaitu berupa penguningan pada daun bawah yang lebih tua, yang diakibatkan karena unsur hara N di daun yang lebih tua diangkut untuk memenuhi kekurangan N pada daun yang lebih muda. Jenis dan tempat gejala pada tanaman seperti ini umumnya dapat menunjukkan unsur hara tertentu yang berada dalam keadaan kurang.

Gejala kekurangan unsur hara tertentu dapat muncul pada daun muda yang baru tumbuh atau pada daun tua yang telah dewasa. Untuk unsur hara mobil seperti N, gejala kekurangan akan muncul pada daun tua. Namun untuk unsur hara imobil seperti P, gejala kekurangan akan muncul pada daun muda. Karena imobil, P pada daun tua tidak dapat ditranslokasi ke daun muda. Akibatnya, daun muda yang kekurangan P menguning, sedangkan daun tua tetap hijau. Cara untuk mengukur kekurangan unsur hara seperti ini disebut **Deteksi Gejala Kekurangan**.

Dengan **Analisis Jaringan Tanaman** dapat ditentukan apakah suatu tanaman kekurangan unsur hara tertentu atau tidak. Contoh tanaman harus ditentukan secara berhati-hati, khususnya berkaitan dengan jenis tanaman, jenis jaringan

Abdul Kadir Salam – 2020

tanaman, umur tanaman, jenis unsur hara, dll. Bagian tanaman tersebut kemudian dianalisis dan hasilnya dibandingkan dengan kurva baku yang menunjukkan apakah tanaman tersebut kekurangan unsur hara yang bersangkutan atau tidak. Bila konsentrasi unsur hara lebih rendah daripada konsentrasi kritis, maka tanaman kekurangan unsur hara tersebut. Bila nilai konsentrasi unsur hara lebih tinggi daripada konsentrasi kritis maka tanaman tidak kekurangan unsur hara tersebut.

Konsentrasi Kritis (Gambar 9.5) adalah konsentrasi unsur hara di dalam jaringan tanaman yang menunjukkan batas bawah kecukupan konsentrasi unsur hara tanaman di dalam suatu jaringan tanaman dengan karakteristik tertentu. Konsentrasi kritis ditentukan berdasarkan pengukuran berulang selama bertahun-tahun. Konsentrasi kritis sangat berkaitan dengan jenis unsur hara, umur tanaman, jenis jaringan tanaman, dan waktu pengambilan contoh jaringan tanaman.

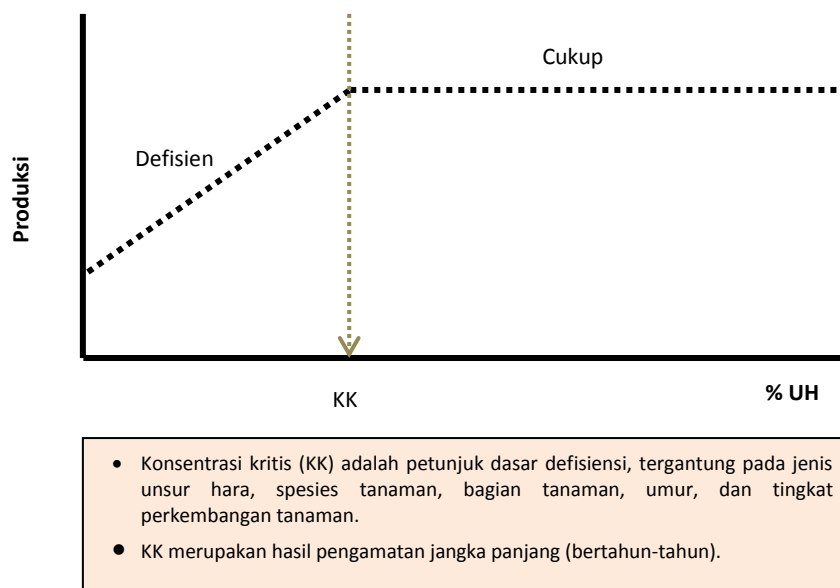
Penentuan jenis dan jumlah unsur hara yang berada dalam keadaan kurang dapat juga dilakukan dengan **Analisis Kimia Tanah**. Untuk melakukan analisis ini, contoh tanah diambil dari lapang. Contoh tanah ini kemudian dibawa ke laboratorium dan diekstrak dengan menggunakan suatu larutan pengeksrak. Filtrat yang dihasilkan setelah dipisahkan dari padatan tanah dengan penyaringan kemudian dianalisis untuk menentukan konsentrasi unsur hara tertentu di dalam tanah tersebut dengan peralatan elektronik atau secara kimiawi.

Secara kimia, unsur hara tanaman dapat disediakan dari berbagai bentuk unsur hara di dalam tanah (**Tabel 9.6**). Tingkat ketersediaan unsur hara berbeda antara satu bentuk dengan bentuk lainnya. Unsur hara terlarut akan sangat tersedia bagi akar tanaman sehingga akar tanaman tidak perlu mengeluarkan energi terlalu tinggi untuk dapat menyerapnya. Unsur hara terikat pada koloid tanah juga dapat tersedia dengan cepat bagi tanaman, namun lebih lambat dibandingkan dengan unsur hara terlarut, karena untuk membebaskan unsur hara terikat dan menyerapnya diperlukan energi yang lebih besar. Sebaliknya, unsur hara dalam endapan serta struktur mineral dan struktur organik lebih lambat tersedia bagi tanaman, sehingga akar tanaman akan lebih sulit untuk dapat menyerapnya tanpa mengeluarkan energi yang lebih tinggi.

Perbedaan bentuk dan ketersediaan unsur hara di dalam tanah tersebut memiliki konsekuensi berbedanya cara mengukur ketersediaan unsur hara bagi tanaman. Tingkat ketersediaan berbagai bentuk unsur hara harus diukur untuk mengetahui potensi kesuburan suatu jenis tanah. Namun demikian, karena berbagai bentuk unsur hara tersebut saling berhubungan maka konsentrasi salah satu bentuk dapat saja menunjukkan atau mencakup konsentrasi bentuk-bentuk lainnya. Hubungan ini dapat difahami dari berbagai penelitian yang telah dilakukan

terkait dengan analisis kimia tanah, yang bertujuan untuk mengukur ketersediaan unsur hara.

Analisis **Unsur Hara Terlarut** dapat dilakukan dengan mudah, setidaknya dengan dua cara. Cara yang paling mudah adalah dengan menambahkan sejumlah air ke dalam suatu massa tanah dan mengocoknya dalam *end-to-end shaker* selama 30-60 menit. Filtrat yang diperoleh dengan menyaring fase cairannya dapat dianalisis dengan menggunakan berbagai peralatan elektronik seperti *flame AAS*. Cara kedua adalah dengan mengambil suatu massa tanah dari lapang dan memisahkan fase cairnya dengan menggunakan supersentrifugator pada kecepatan sampai dengan 20.000 rpm. Fase cairnya diambil dan dianalisis dengan AAS. Hasil analisis dengan kedua cara tersebut adalah konsentrasi unsur hara terlarut (Salam dkk., 1998f). Cara kedua menggambarkan kondisi lapang sedangkan cara pertama melibatkan pengenceran sehingga perlu dikonversi berdasarkan kadar airnya untuk memperoleh kondisi lapang.



Gambar 9.5. Konsentrasi kritis unsur hara di dalam jaringan tanaman.

Abdul Kadir Salam – 2020

Hasil pengukuran di atas sebenarnya menunjukkan penjumlahan dua bentuk unsur hara, yaitu: ion-ion bebas dan ion-ion kompleks dan khelat. Untuk mengukur konsentrasi ion bebas logam berat secara langsung di dalam air tanah dapat dilakukan dengan beberapa metode. *Anodic Stripping Voltametry* (ASV) dapat digunakan secara akurat pada tingkat ppb atau sub-ppb, tetapi sangat rentan terhadap interferensi untuk sistem air alami (Figura dan McDuffie, 1980). Selain cara ini, *Ion Selective Electrode* dapat digunakan juga untuk tujuan ini, namun batas deteksi metode ini terlalu tinggi untuk sistem alami (Jackson dan Bondietti, 1977; Minnich dan McBride, 1987). Yang dapat mencapai batas deteksi adalah *Ion Exchange Chromatography* (HPLC), tetapi ion kompleks alami sering tidak stabil dalam eluen kromatografi yang cocok (Ge dan Wallace, 1988).

Ion Exchange Resin dapat juga digunakan dengan menyetimbangkan larutan contoh dalam percobaan "batch" atau percobaan kolom (Cantwell dkk., 1982; Treit dkk., 1983). Kesetimbangan dicapai dengan melewati larutan contoh melalui sebuah kolom cation-exchange resin sampai *breakthrough* lengkap dari kation logam berat terjadi. Setelah pencucian dengan air, kation yang dijerap dapat dikeluarkan dari resin dan diukur konsentrasinya. Metode ini memiliki batas deteksi yang baik tetapi dapat mengganggu kesetimbangan larutan tanah yang dipelajari (Treit dkk., 1983).

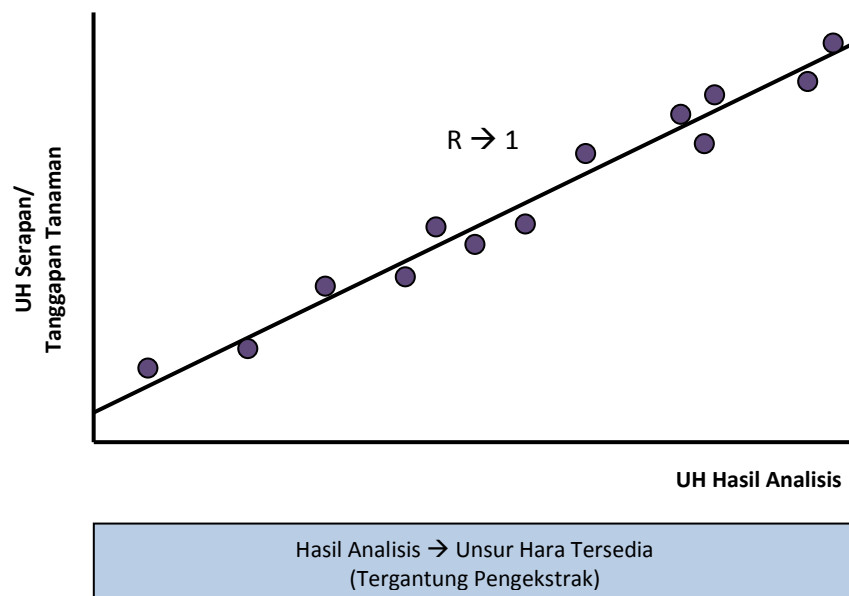
Ion bebas juga dapat dipisahkan dan diukur dengan akurat menggunakan *ion exchanger* dalam bentuk membran selektif (Lampert, 1982; Fitch dan Helmke, 1989; Helmke dkk., 1993; Salam dan Helmke, 1995; 1998). Metode ini merupakan cara terbaik untuk memisahkan ion bebas logam berat secara selektif dari larutan tanah dengan menggunakan kesetimbangan Donnan (Blaedel dan Hauptert, 1966). Metode ini bebas dari interferensi, tidak mengubah kesetimbangan larutan contoh, dan relatif sensitif.

Unsur Hara Dapat Dipertukarkan dalam bentuk kation dapat dianalisis dengan menggunakan larutan pengekstrak yang terdiri dari garam, misalnya 1 N NH_4OAc pH 7 atau 1M NH_4NO_3 . Dengan cara ini, sejumlah tertentu massa tanah (misalnya 2 gram setara berat kering) diekstrak dengan menggunakan 5 kali 20 ml 1 N NH_4OAc pH 7 dan dikocok dalam *end-to-end shaker* selama waktu tertentu. Filtrat yang diperoleh dengan penyaringan disatukan dan dianalisis dengan menggunakan AAS. Hasil yang terukur adalah Unsur Hara Dapat Dipertukarkan.

Sebenarnya, di dalam filtrat di atas juga terkandung unsur hara terlarut. Namun, karena konsentrasi unsur hara di dalam larutan tanah jauh lebih rendah dibandingkan dengan yang terikat pada koloid tanah, maka keberadaan unsur hara terlarut dapat diabaikan. Misalnya, K-Larut berkisar 1 – 50 ppm atau 0.4 – 20 kg ha^{-1} , jauh lebih rendah dibandingkan dengan K-dd yang berkisar pada 200 kg ha^{-1} atau

hanya sekitar 0.2 -10% dari K-dd. Untuk tanah subur dengan K tinggi, konsentrasi K-Larut memang cukup signifikan, namun untuk kebanyakan tanah di Indonesia yang miskin K, K-Larut jauh lebih rendah daripada K-dd.

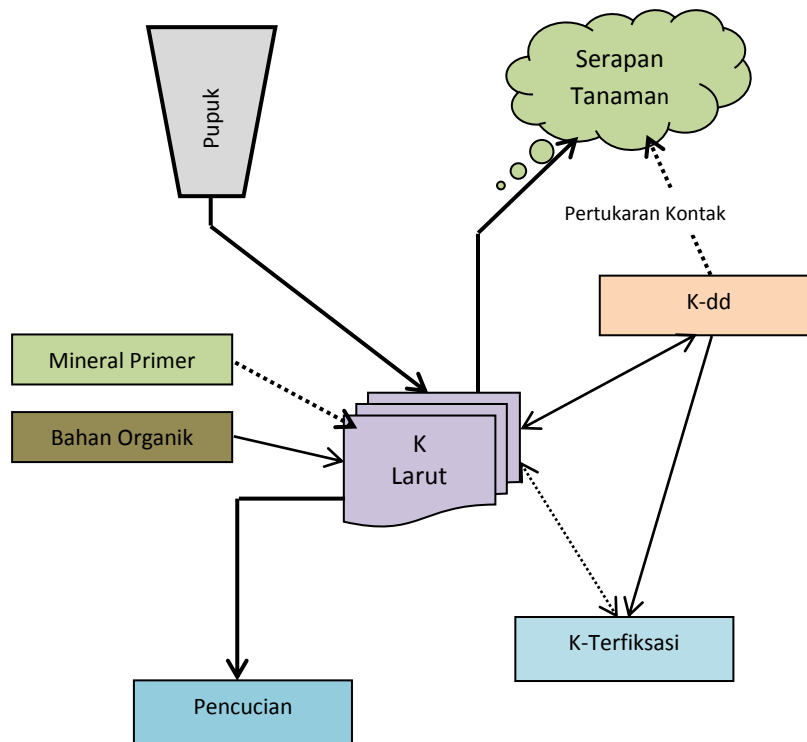
Unsur hara tersedia bagi tanaman tidak hanya berasal dari unsur hara terlarut ditambah dengan unsur hara dapat dipertukarkan, tetapi juga mencakup sebagian atau seluruh isi mineral endapan dan/atau mineral primer di dalam tanah. Kondisi ini menimbulkan usaha *trial and error* melalui penelitian untuk menentukan ketersediaan unsur hara. *Trial and error* ini berisi usaha untuk meniru cara akar tanaman dalam menyerap unsur hara. Dengan usaha ini berbagai larutan pengekstrak digunakan dalam berbagai penelitian untuk menentukan ketersediaan unsur hara. Larutan pengekstrak yang memunculkan hasil analisis yang berkorelasi tinggi dengan serapan unsur hara oleh tanaman akan lebih valid digunakan. Usaha untuk membuat korelasi hasil analisis kimia dan serapan unsur hara oleh tanaman disebut **Uji Korelasi (Gambar 9.6)**.



Gambar 9.6. Teknik Analisis Kimia Tanah versus Teknik Ekstraksi oleh akar tanaman.

Berbagai laporan penelitian menunjukkan bahwa unsur hara yang tersedia bagi tanaman mencakup ion bebas, ion kompleks, ion dapat-dipertukarkan ditambah bagian tertentu dari endapan dan mineral tanah, dengan kecepatan ketersediaan yang berbeda. Misalnya, dalam kasus K, kecepatan ketersediaan berbagai bentuk K di dalam tanah diperlihatkan pada **Tabel 9.10**. Ketersediaan K mencakup K-Larut, K-dd, K-Terfiksasi, dan K struktural dalam mineral.

Untuk memberi gambaran tentang teknis analisis kimia tanah maka kita gunakan contoh unsur hara K. Hubungan antara berbagai bentuk K di dalam tanah digambarkan pada **Gambar 9.7**, sedangkan metode analisis kimia yang digunakan untuk mengukur ketersediaan masing-masing bentuk unsur hara K disajikan pada **Tabel 9.11**. Beberapa pengekstrak untuk mengukur ketersediaan unsur hara lain disajikan pada **Tabel 9.12**, baik untuk analisis unsur hara makro maupun unsur hara mikro. Misalnya, DTPA untuk menganalisis ketersediaan unsur hara mikro (Salam dkk., 1997g; 1997l).



Gambar 9.7. Hubungan antara berbagai bentuk unsur hara K di dalam sistem tanah.

Tabel 9.10. Derajat ketersediaan bentuk-bentuk K di dalam tanah.

Cepat Tersedia	Agak Cepat Tersedia	Lambat Tersedia
→ K Larut	→ K Terfiksasi	→ K Muskovit
→ K-dd	→ K Biotit	→ K Feldspar
<ul style="list-style-type: none"> → Setelah larut, ion K akan berdifusi menuju akar tanaman → K terfiksasi larut bila [K] rendah → K biotit: Fe^{2+} (oktahedral) → Fe^{3+} (akibatnya muatan turun dan lapisan mengembang → ion K bebas) → K lambat tersedia → tersedia dalam jangka panjang 		

*Diadaptasi dari Corey (1964)

Tabel 9.11. Metode analisis ketersediaan K di dalam tanah*

Jenis K	Larutan Pengekstrak
Larut Air	Air dengan Kadar Air s/d 1:10 atau >
Aktivitas	0.001 M $CaCl_2$
Dapat Dipertukarkan	N NH_4OAc pH 7 atau garam lain
Terfiksasi	HNO_3 mendidih; Larutan Na-TPB (Natrium Tetrafenil Boron)
Terfiksasi Total (Tidak Dapat Dipertukarkan)	Penjenuhan dengan NH_4OAc ; pemanasan s/d 300 C; ekstraksi dengan NH_4OAc HF (Biasanya dalam kehadiran H_2SO_4 atau $HClO_4$ atau keduanya)

*Diambil dari Corey (1964)

Tabel 9.12. Beberapa contoh pengekstrak unsur hara yang banyak digunakan dalam pertanian.

1	2	3
P	Ca, Mg, K, dan Na	Unsur Mikro Kelompok Logam
Bray I	1 N NH ₄ OAc pH 7	DTPA
Bray II	1 M NH ₄ NO ₃	EDTA
Asam Encer		

Selain DTPA dan EDTA, beberapa jenis pengekstrak juga digunakan untuk menentukan status unsur hara mikro kelompok logam berat. Salam dkk. (1997) menggunakan tiga jenis pengekstrak untuk mengukur status unsur hara mikro kelompok logam berat, yaitu: air, 2 N CaCl₂, dan DTPA (Baker dan Amacher, 1982). Dengan menggunakan **Gambar 9.2**, Air digunakan untuk menentukan unsur hara yang larut di dalam air tanah (M-Larut), yang mencakup ion-ion bebas dan ion-ion kompleks. Pengekstrak CaCl₂ digunakan untuk mengukur unsur hara dapat dipertukarkan (M-dd), yang berada pada koloid negatif tanah dengan jumlah yang lebih besar daripada di dalam air tanah. Pengekstrak DTPA mengeluarkan unsur hara yang tersedia bagi tanaman dari dalam tanah. Yang diekstrak oleh DTPA bukan hanya unsur hara yang larut dalam air tanah (M-Larut) dan unsur hara yang dapat dipertukarkan (M-dd), tetapi juga unsur hara struktural di dalam mineral tanah. Contoh perbandingan unsur mikro kelompok logam berat dalam tanah yang telah diperlakukan 20 ton ha⁻¹ limbah industri sendok logam yang diukur dengan ketiga pengekstrak tersebut disajikan pada **Tabel 9.13** (Cu) dan **Tabel 9.14** (Zn).

Milanti (2020) juga menggunakan beberapa jenis pengekstrak untuk menganalisis logam berat di tanah tercemar Cu. Perbandingan hasil analisis dengan pengekstrak tersebut disajikan pada **Tabel 9.15**. Tampak jelas bahwa setiap jenis pengekstrak mengukur jumlah Cu yang berbeda di dalam tanah. CaCl₂ dan NH₄OAc memiliki kekuatan relatif paling rendah karena hanya mampu mengekstrak Cu-dd, sedangkan DPTA mampu mengekstrak jumlah Cu lebih besar karena mengekstrak juga endapan yang mudah larut. Pengekstrak HNO₃ dan HCl memiliki kekuatan ekstraksi terbesar karena juga mengekstrak endapan lebih sulit

Abdul Kadir Salam – 2020

larut. Hampir semua metode dapat digunakan khususnya untuk konsentrasi Cu relatif rendah di dalam tanah.

Tabel 9.13. Hasil pengukuran Cu dengan beberapa pengestrak.

Tanah	Kapur (ton ha ⁻¹)	Air (µg kg ⁻¹)	CaCl ₂ (mg kg ⁻¹)	DTPA (mg kg ⁻¹)
Ultisol Gedong Meneng (Bandar Lampung)	0	58	0.64	60
	5	52	0.13	41
Alfisol Banjar Agung (Lampung Timur)	0	75	0.98	49
	5	54	0.14	35
Vertisol Cihea (Cianjur, Jawa Barat)	0	31	0.45	53
	5	88	0.34	35

Diadaptasi dari Salam dkk. (1997k)

Tabel 9.14. Hasil pengukuran Zn dengan beberapa pengestrak.

Tanah	Kapur* (ton ha ⁻¹)	Air (µg kg ⁻¹)	CaCl ₂ (mg kg ⁻¹)	DTPA (mg kg ⁻¹)
Alfisol Gedong Meneng (Bandar Lampung)	0	107	11.5	8
	5	16	1.3	11
Alfisol Banjar Agung (Lampung Timur)	0	104	10.2	9.4
	5	35	1.3	11.5
Vertisol Cihea (Cianjur, Jawa Barat)	0	37	6.7	10.4
	5	24	0.4	12.4

Diadaptasi dari Salam dkk. (1998f); *Dosis kapur 5 ton CaCO₃ ha⁻¹

Tab 9.15. Perbandingan hasil analisis Cu dengan menggunakan beberapa jenis pengestrak.

Pengestrak	pH	Rataan Cu* Terekstrak (mg kg ⁻¹)	Kekuatan Relatif**
DTPA 0.005 M + 1 M CaCl ₂ Disangga	7.30	15.3	1.00
DTPA 0.005 M Tidak Disangga	8.14	20.9	1.37
HCl 1 N	1.38	38.9	2.54
HNO ₃ 1 N	0.72	44.3	2.90
CaCl ₂ 1 M	7.38	0.46	0.03
NH ₄ OAc 1 M Disangga	7.00	0.63	0.04

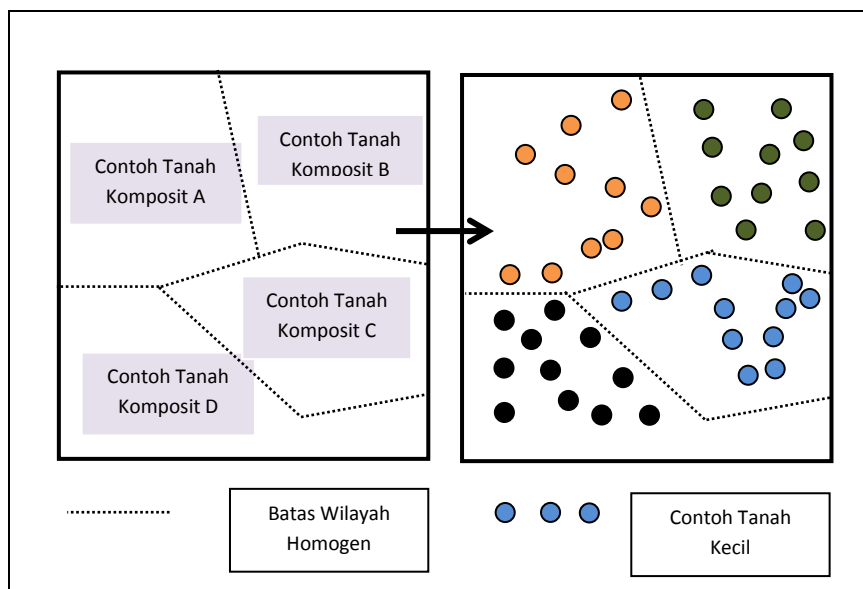
*Rataan dari 36 contoh tanah tercemar Cu, **Kekuatan Relatif = Perbandingan Cu terekstrak dengan yang terekstrak oleh (DTPA 0.005 + M CaCl₂ Disangga); diambil dari Milanti (2020).

Yang juga penting berkaitan dengan validitas hasil analisis kimia tanah adalah keterwakilan tanah oleh contoh tanah yang digunakan. Untuk memperoleh contoh tanah yang mewakili, perlu terlebih dahulu ditentukan jenis tanah, batas-batas tanah, atau wilayah yang dianggap homogen (**Gambar 9.8**). Satu contoh tanah komposit dapat diambil dengan sejumlah contoh tanah kecil dengan menggunakan bor dan diaduk rata. Umumnya diperlukan 10 – 20 contoh tanah kecil untuk sebuah contoh tanah komposit. Contoh tanah kemudian dimasukkan ke dalam wadah yang bersih untuk menghindari kontaminasi. Contoh tanah ini kemudian digunakan dalam analisis kimia tanah.

Uji Pertumbuhan Biologis dapat juga digunakan untuk menentukan kebutuhan unsur hara, bahkan cara ini merupakan cara yang paling tepat, walaupun biaya pelaksanaannya lebih mahal dan waktu yang diperlukan untuk memperoleh hasil analisis lebih lama. Cara yang paling sederhana untuk melakukan uji pertumbuhan biologis adalah dengan membagi lahan percobaan menjadi beberapa petak dan memberikan perlakuan yang berbeda pada setiap petak. Perlakuan tersebut dapat berupa pemberian unsur hara tertentu dalam beberapa tingkat. Pertumbuhan

biologis kemudian diamati dan hasilnya dibandingkan antara perlakuan untuk menetapkan tingkat keperluan unsur hara (**Gambar 9.9**).

Pada **Gambar 9.9** terlihat bahwa lahan dibagi menjadi empat petak, masing-masing terdiri atas dua petak untuk satu perlakuan. Dua petak pertama tanpa perlakuan, hanya ditanami; dan dua petak sisanya diperlakukan dengan penambahan N pada dosis tertentu dan ditanami (**Uji Plus**). Tanaman di atasnya dipelihara dan hasil panen dicatat dan disajikan dalam bentuk diagram. Bila hasilnya mendekati Diagram A maka tanah kekurangan N. Sebaliknya, bila hasilnya menyerupai Diagram B atau Diagram C maka tanah tidak kekurangan N. Selain Uji Plus, ada juga **Uji Minus** dan **Uji Level**.



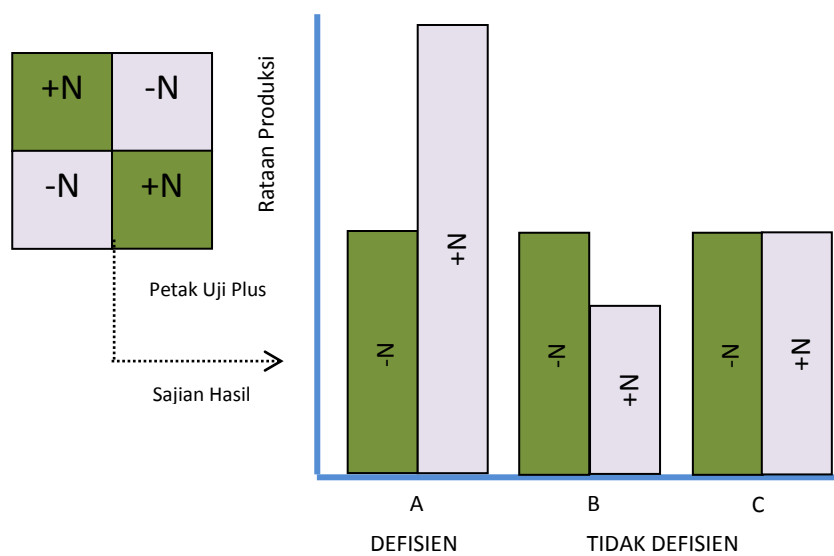
Gambar 9.8. Pengumpulan contoh tanah kecil dan contoh tanah komposit.

9.6 Pupuk dan Pemupukan

Tanah subur semestinya tidak memerlukan pupuk, yang merupakan sumber unsur hara dari luar sistem tanah. Dalam tanah subur, seluruh keluaran unsur hara

Abdul Kadir Salam – 2020

dari sistem tanah yang mencakup: penyerapan oleh akar tanaman, pencucian, penguapan, dan erosi dapat diimbangi oleh berbagai faktor masukan dari sumber internal tanah, yang mencakup: dekompleksasi, desorpsi, dekomposisi bahan organik, dan pelapukan mineral tanah. Dalam kondisi seperti ini tidak diperlukan masukan dari sumber luar sistem tanah, yang memerlukan biaya tinggi. Hal ini karena unsur hara yang terkandung di dalam padatan mineral tanah adalah yang terbanyak, khususnya pada tanah dengan kandungan mineral-mineral muda relatif banyak.

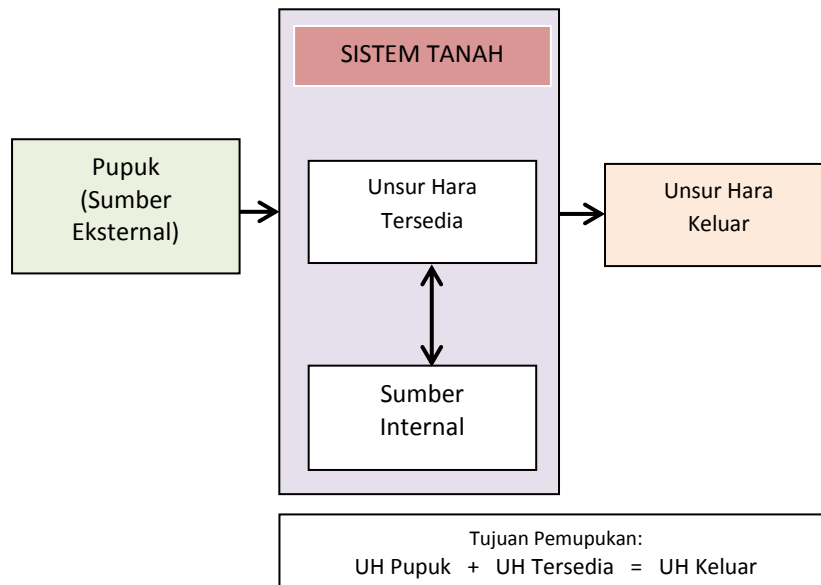


Gambar 9.9. Uji biologis untuk menetapkan jenis dan jumlah kebutuhan hara.

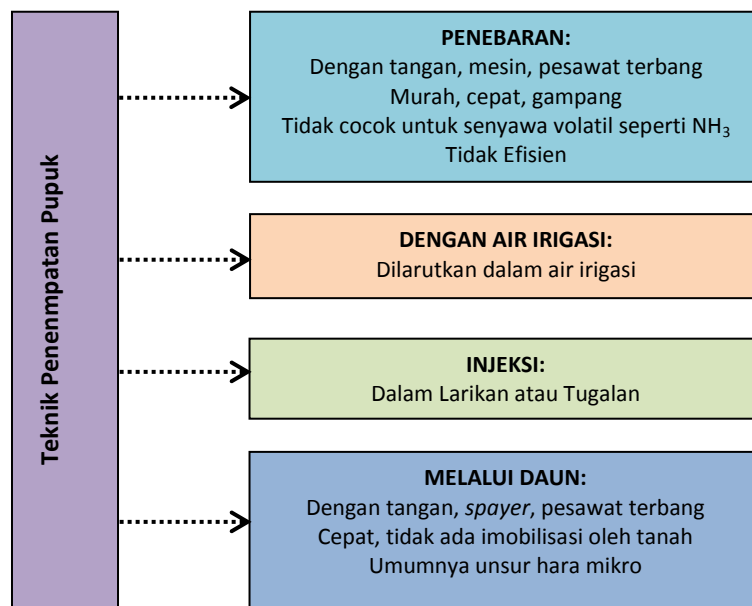
Namun demikian, masalah biasanya timbul pada tanah tua, dengan kandungan mineral muda rendah. Dalam keadaan demikian, unsur hara yang dibebaskan dari padatan tanah sangat rendah dan tidak berarti bagi pertanian intensif. Akibatnya, neraca hara di dalam sistem tanah bersifat negatif atau unsur hara dari sumber internal yang masuk ke dalam air tanah lebih rendah daripada unsur hara yang keluar dari sistem tanah. Oleh karena itu, tanah memerlukan sumber eksternal

untuk mengompensasi kekurangan pasokan di atas. Sumber unsur hara dari luar sistem tanah ini disebut **Pupuk** (*Fertilizers*). Pupuk yang diberikan ke dalam tanah dimaksudkan untuk mengimbangi keluaran unsur hara yang relatif lebih tinggi (**Gambar 9.10**).

Setelah jenis dan jumlah unsur hara yang berada dalam keadaan kurang diketahui dengan baik, yang perlu dilakukan adalah menambahkan unsur hara (Shenker dan Chen, 2005), yang umumnya dinamakan **Pemupukan**. Supaya pupuk yang diberikan ke dalam tanah dapat mencapai tujuan, yaitu mengimbangi kekurangan masukan unsur hara, maka pupuk harus diberikan dengan teknik yang memiliki peluang terbesar untuk dapat diserap oleh tanaman. Namun demikian, terkadang teknik pemupukan juga harus mempertimbangkan faktor waktu dan tenaga kerja. Suatu metode yang efektif dalam memberikan unsur hara bagi tanaman, belum tentu efisien setelah kita memasukkan pertimbangan faktor ekonomi, sehingga teknik yang sebenarnya akan memboroskan unsur hara di dalam tanah justeru digunakan secara masif. Beberapa jenis teknik pemupukan yang banyak digunakan disajikan pada **Gambar 9.11**.



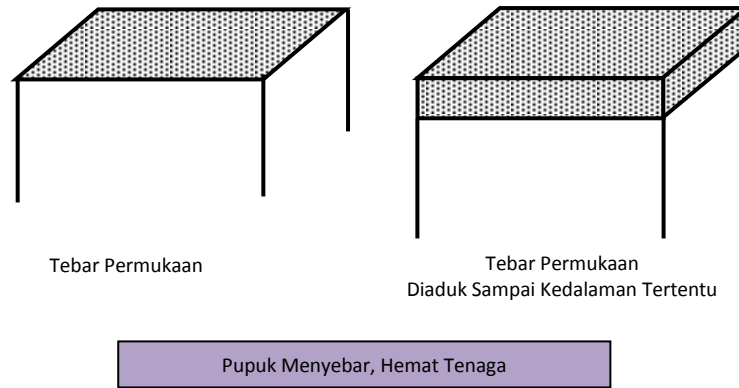
Gambar 9.10. Pemupukan untuk mengimbangi pengeluaran unsur hara yang lebih tinggi daripada pemasukan.



Gambar 9.11. Teknik penempatan pupuk.

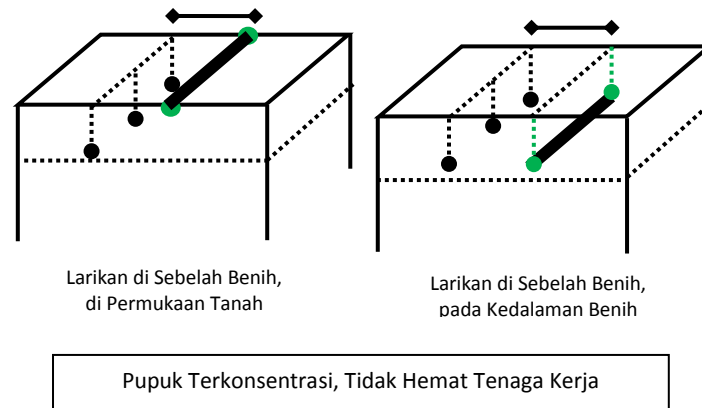
Pemupukan dapat dilakukan dengan beberapa teknik, yaitu Teknik Tebar (termasuk di dalamnya Teknik Irigasi), Teknik Injeksi (mencakup Teknik Larikan dan Teknik Tugal), dan Teknik Daun. Yang pertama adalah **Teknik Tebar** (*Broadcast*) (Gambar 9.12). Sebagian teknik penempatan pupuk dengan menggunakan air irigasi merupakan bagian dari teknik ini, khususnya yang diterapkan di permukaan tanah. Dengan teknik ini, pupuk disebar merata di permukaan tanah. Teknik ini secara ekonomi sangat efisien, karena memerlukan sedikit tenaga kerja dan sangat cepat. Penerapannya dapat dilakukan dengan berbagai alat, mulai dari menggunakan tangan, mesin, sampai menggunakan pesawat terbang. Namun demikian, dari sisi keefektifan pemupukan, teknik ini kurang bagus. Unsur hara yang berada jauh dari permukaan akar tanaman harus bergerak sangat jauh, karena permukaan serap akar tanaman berada pada posisi yang jauh dan dalam, sehingga sebagian unsur hara yang diberikan kemungkinan tidak akan mencapai akar tanaman dan tidak dimanfaatkan oleh tanaman. Metode ini juga tidak cocok untuk

pemupukan dengan senyawa volatil seperti NH_3 , yang memerlukan penempatan di dalam tanah.



Gambar 9.12. Penerapan pupuk dengan cara tebar.

Cara yang kedua adalah **Teknik Larikan** (*Side Dressing, Injection*). Pupuk diberikan di dalam larikan di samping barisan tanaman (**Gambar 9.13**). Teknik ini menempatkan pupuk lebih terkonsentrasi di dekat perakaran tanaman, sehingga pergerakan unsur hara menuju akar tanaman menjadi lebih cepat karena jaraknya semakin pendek. Secara teknis cara ini lebih efisien daripada Teknik Tebar. Westemann dan Sojka (1996) melaporkan bahwa penggunaan Teknik Larikan meningkatkan serapan N 28%, berat kering tanaman sebesar 6%, dan total hasil tanaman kentang 9% dibandingkan dengan penggunaan Teknik Tebar. Namun demikian, dengan teknik ini masih ada sebagian pupuk yang posisinya berada jauh dari akar tanaman, yang menyebabkan sebagian unsur hara tidak dimanfaatkan dengan baik oleh tanaman, kecuali kalau jarak tanam di dalam barisan tanaman cukup rapat. Secara ekonomi, cara ini kurang efisien, karena memerlukan waktu dan tenaga kerja lebih banyak.

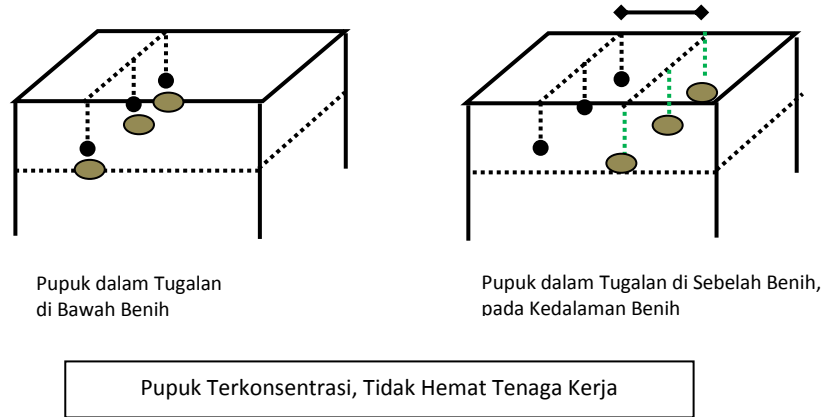


Gambar 9.13. Penerapan pupuk dengan cara Injeksi (dalam Larikan).

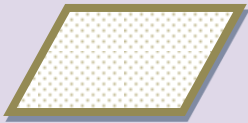
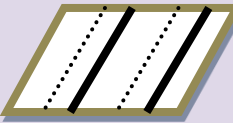
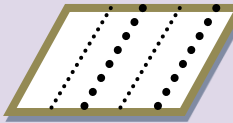
Yang ketiga adalah **Teknik Tugal (Injection)**. Dengan teknik ini, massa pupuk dikonsentrasikan pada titik-titik yang dekat dengan akar tanaman (**Gambar 9.14**). Pupuk biasanya diberikan pada kedalaman dan jarak tertentu dari lubang tanam sehingga memungkinkan unsur hara bergerak menuju perakaran tanaman dengan lebih mudah dan cepat. Dasi sisi ketersediaan unsur hara, teknik ini sangat efisien; namun dari sisi ekonomi, teknik ini sangat tidak efisien karena memerlukan waktu dan tenaga kerja cukup banyak. Namun demikian, dengan menggunakan peralatan modern, permasalahan ini dapat diatasi, karena penempatan pupuk dapat dilakukan dengan menggunakan mesin.

Pemupukan K dapat diterapkan dengan menggunakan berbagai teknik di atas. Untuk tanah dengan kadar K tinggi atau dengan KTK tinggi, sehingga memungkinkan dipupuk K dalam dosis tinggi, maka dapat digunakan Teknik Tebar (**Gambar 9.15**). Hal ini karena KTK tinggi akan menjamin bahwa sebagian K asal pupuk dapat disimpan sementara dalam bentuk K-dd. K-dd pada akhirnya dapat dibebaskan pada saat K larut turun dan bergerak secara difusi menuju permukaan akar tanaman. Sebaliknya, bila tanah memiliki kadar K rendah, pupuk K diterapkan

dengan dosis rendah menggunakan Teknik Injeksi (Larikan atau Tugalan) agar K yang diberikan dapat secara efisien diserap oleh akar tanaman.



Gambar 9.14. Penerapan pupuk dengan cara Injeksi (dalam Tugalan).

Tebar	Larikan	Tugal
		
<p>Untuk tanah dengan kadar K tinggi; pupuk K tinggi</p>	<p>Untuk tanah dengan kadar K rendah; pupuk K rendah</p> <p>..... : Barisan Tanaman</p> <p>———— : Pupuk dalam larikan</p> <p>●●●●●● : Pupuk dalam tugal</p>	

Gambar 9.15. Teknik penempatan pupuk K di tanah pertanian.

Pupuk terdiri dari berbagai jenis. Dari sisi strukturnya, pupuk dibagi menjadi dua jenis. Yang pertama **Pupuk Organik**, yang berasal dari pengolahan berbagai sisa tanaman, sisa hewan, dan sisa manusia. **Kompos** adalah salah satu jenis pupuk organik yang diolah dari berbagai sisa tanaman dengan cara pembusukan sampai mencapai nisbah C/N rendah sekitar 12. Yang kedua adalah Pupuk Nir-Organik atau dikenal dengan julukan **Pupuk Kimia** atau **Pupuk Buatan (Tabel 9.16)**. Urea, SP-36, dan KCl adalah Pupuk Buatan, masing-masing adalah sumber N, P, dan K, yang merupakan tiga unsur hara makro yang paling banyak diperlukan oleh tanaman. Dari sisi kandungan haranya, terdapat pupuk tunggal dan pupuk majemuk. **Pupuk Tunggal** hanya memiliki satu unsur hara di dalamnya, sedangkan **Pupuk Majemuk** memiliki dua atau lebih unsur hara di dalamnya.

Selain dari jenis kimia, saat ini juga berkembang pupuk biologis. **Pupuk Biologis** berisi mikroorganisme yang bila masuk ke dalam tanah akan berubah menjadi agen aktif yang mempercepat dekomposisi bahan organik, sehingga cepat membusuk dan mengeluarkan unsur haranya. Agen biologis yang digunakan dalam pupuk ini dapat berupa berbagai mikroorganisme penghasil enzim, yang dapat mempercepat berbagai reaksi biokimia yang membebaskan unsur hara struktural dari bahan organik sehingga tersedia bagi tanaman. Agen biologis ini juga dapat berupa mikroorganisme yang dapat memperluas bidang serap dan volume jangkauan akar tanaman, sehingga dapat melipatgandakan penyerapan unsur hara dan air dari dalam tubuh tanah. Mikoriza, yang merupakan simbiosis antara jamur dan akar tanaman, adalah pupuk biologis jenis ini.

Kandungan unsur hara di dalam setiap pupuk berbeda dan ini merupakan faktor penting untuk menentukan jumlah yang harus ditambahkan per satuan luasan tanah berdasarkan kebutuhan tanaman pada suatu tanah tertentu. Kandungan unsur hara di dalam pupuk secara klasik biasanya ditulis dalam bentuk kombinasi tiga angka, misalnya 20-10-5. Angka pertama adalah kandungan N (20%), angka kedua adalah kandungan P_2O_5 (10%), dan diikuti angka ketiga adalah kandungan K_2O (5%). Unsur hara lain biasanya diberikan di belakang ketiga angka tersebut, misalnya 20-10-5+2%Cu+1%Zn. Angka ini menunjukkan kandungan minimum yang pasti terdapat di dalam pupuk tersebut.

Pupuk N, yang diberikan dalam jumlah terbanyak ke lahan pertanian, dapat diberikan dalam berbagai bentuk. Yang pertama adalah Amonia (NH_3). Pupuk ini diberikan dalam bentuk gas dan disimpan dalam bentuk cairan dalam tekanan tinggi atau temperatur rendah. Pupuk ini mengandung 82% N dan sangat populer di Amerika Serikat tetapi tidak populer di Indonesia. Pupuk NH_3 merupakan bahan dasar untuk pembuatan pupuk N lainnya. Amonia dapat direaksikan dengan berbagai asam dalam bentuk cairan dan hasilnya kemudian dikeringkan

membentuk Urea, Amonium Nitrat, dan sebagainya. Urea merupakan pupuk N yang paling populer di Indonesia.

Tabel 9.16. Beberapa contoh pupuk kimia atau pupuk buatan*.

Hara	Pupuk	Kandungan (%)
N	Amonium Nitrat (NH_4NO_3)	34
	Amonium Sulfat ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$)	21
	Kalsium Nitrat ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$)	15
	Urea ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$)	45
P	Batuan Fosfat ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$)	9-12
	<i>Triple Superphosphate</i> ($\text{TSP Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$)	20
K	Kalium Sulfat (K_2SO_4)	44
	Kalium Klorida (KCl)	53
S	Kalsium Sulfat atau Gypsum ($\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$)	18
	Sulfur (S)	100
Ca	Kalsit (CaCO_3)	40
	Dolomit ($(\text{Ca}, \text{Mg})(\text{CO}_3)_2$)	21.7
	<i>Triple Superphosphate</i> ($\text{TSP Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$)	20
	Batuan Fosfat ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$)	9-12
	Kalsium Nitrat ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$)	15
	Kalsium Sulfat atau Gypsum ($\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$)	18
Mg	Dolomit ($(\text{Ca}, \text{Mg})(\text{CO}_3)_2$)	13.1
Fe	Fero Sulfat ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)	19
	Besi Kelat (NaFe-EDTA)	5-14
	Besi Kelat (NaFe-DTPA)	10
Mn	Mangan Sulfat ($\text{MnSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$)	26-28
	Mangan Oksida (MnO_2)	63
	Mangan Kelat (Mn-EDTA)	5-12
Zn	Seng Sulfat Monohidrat ($\text{ZnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$)	35
	Seng Sulfida (ZnS)	67
	Seng Kelat ($\text{Na}_2\text{Zn-EDTA}$)	14
Cu	Tembaga Asetat ($\text{Cu}(\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$)	32
	Tembaga Kelat ($\text{Na}_2\text{Cu-EDTA}$)	13
	Tembaga Kelat (NaCu-HEDTA)	9
B	Boraks ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)	11
	Asam Borat (H_3BO_3)	17
	Natrium Pentaborat ($\text{Na}_2\text{B}_{10}\text{O}_{16} \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)	18
Mo	Natrium Molibdat ($\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)	39
	Amonium Molibdat ($(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)	54

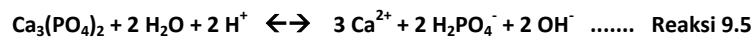
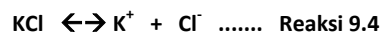
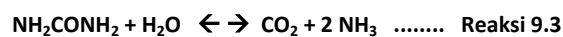
*Tisdale dkk. (1985); Kasno dkk. (1998)

Pupuk P berasal dari mineral Apatit, yaitu Kalsium Fosfat, yang kurang larut sehingga tidak dapat dimanfaatkan oleh tanaman. Mineral ini biasanya disebut batuan fosfat, yang bila diperlakukan dengan asam (misalnya asam fosfat) akan memberikan kalsium fosfat (0-20-0 atau 0-46-0) dengan P yang lebih mudah dimanfaatkan oleh tanaman. Fosfor merupakan unsur hara kedua terbanyak yang ditambahkan ke dalam tanah, setelah N.

Pupuk K dibuat dari deposit mineral yang mengandung K seperti K-Muriat dan Langbeinit. K-Muriat dimurnikan menjadi KCl (0-0-60) sedangkan Langbeinit menjadi K-MgSO₄ (0-0-11+11%Mg). Pupuk K lainnya adalah K₂SO₄ (0-0-50), KNO₃ (13-0-44) dan K₃PO₄ (0-26-26). Kalsium umumnya dari batuan kapur (Kalsit) dan Gypsum. Magnesium berasal dari K-MgSO₄, batu kapur (dolomit) atau MgSO₄. Belerang dapat diberikan dalam bentuk S atau sulfat seperti MgSO₄ atau K₂SO₄.

Unsur Hara Mikro (Fe, Mn, Zn, dan Cu) dapat diberikan dalam tiga bentuk. Pertama, dalam bentuk garam sulfat, misalnya ZnSO₄; kedua, dalam bentuk khelat, yang merupakan senyawa organik yang bereaksi dengan unsur hara mikro membentuk senyawa yang relatif larut; dan ketiga, bentuk *fritts* atau FTE (*fritted trace elements*).

Setelah diperlakukan, pupuk di dalam tanah akan mengalami berbagai reaksi. Reaksi akan terjadi di dalam air tanah. Oleh karena itu pemupukan harus dibarengi dengan pemberian air untuk tanah dan tanaman. Berikut adalah reaksi yang terjadi pada pupuk N dalam bentuk Urea, K dalam bentuk KCl, dan P dalam bentuk batuan fosfat.



Reaksi-reaksi di atas menunjukkan bahwa air merupakan reaktan yang sangat penting di dalam tanah; tanpa kehadiran air tidak akan terjadi proses-proses di atas. Melalui proses di atas, ion bebas NO₃⁻ (yang berasal NH₃ yang telah mengalami proses amonifikasi dan nitrifikasi), K⁺, dan HPO₄²⁻ dibebaskan, bergerak dalam air tanah, dan siap diserap oleh akar tanaman pada saat mencapai permukaan akar tanaman.

Pupuk biologis dan pupuk organik memiliki reaksi yang saling berkaitan karena unsur hara yang dibebaskan berasal dari sumber yang sama, yaitu bahan organik. Bahan organik melapuk dipercepat oleh kehadiran enzim. Enzim tanah dihasilkan

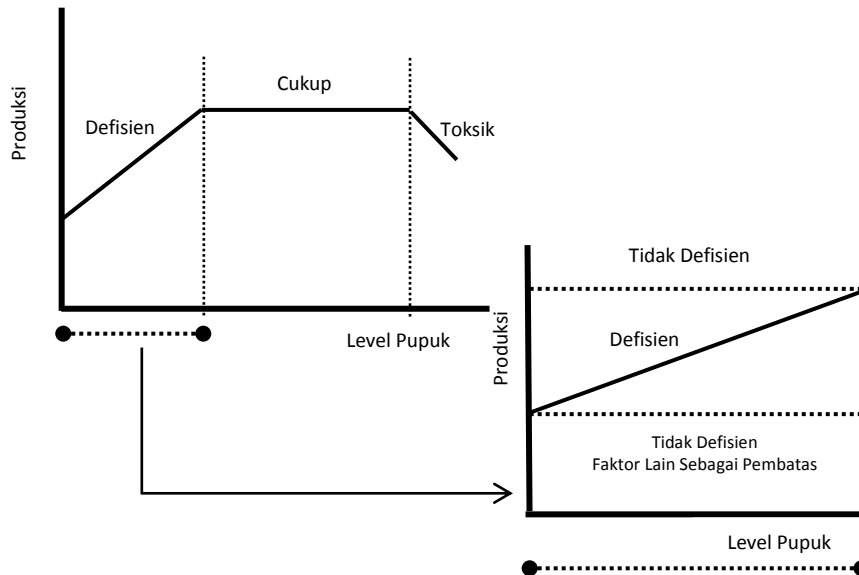
oleh berbagai mikroorganisme, akar tanaman, dan makroorganisme tertentu seperti cacing tanah. Pupuk biologis berisi berbagai jenis mikroorganisme, yang bila masuk ke dalam sistem tanah akan bertumbuh dan berkembang dan menghasilkan enzim tanah. Dengan demikian, pupuk organik berisi unsur hara yang asal-usulnya adalah dari senyawa organik, sedangkan pupuk biologis terdiri dari mikroorganisme yang bila menjadi aktif di dalam tanah akan menyerang berbagai ikatan organik di dalam senyawa-senyawa organik. Pupuk biologis tidak dapat berkerja di dalam tanah yang tidak memiliki bahan organik.

Setiap jenis dan bentuk pupuk akan cocok untuk jenis tanah dan tanaman tertentu. Untuk menentukan kecocokan tersebut perlu dilakukan penelitian. Pemberian pupuk juga tidak selalu berakibat baik bagi tanaman. Pemberian pupuk di **Wilayah Defisiensi (Gambar 9.16)** meningkatkan pertumbuhan dan produksi tanaman secara maksimal, sampai pertumbuhan dan produksi tanaman mencapai nilai maksimum. Setelah produksi maksimum tercapai, tanaman masih tetap menyerap unsur hara walaupun penyerapan ini tidak meningkatkan pertumbuhan dan produksi tanaman. Wilayah ini disebut **Luxurious Consumption**, yang banyak ditemui untuk pemupukan K. Pada takaran yang terlalu tinggi, tanaman akan menunjukkan gejala keracunan (**Toksisitas**), yang menyebabkan tanaman bisa terganggu atau mati.

Wilayah defisiensi menunjukkan dua hal yang istimewa terkait dengan takaran pupuk. Yang pertama adalah takaran maksimum dan yang kedua adalah takaran optimum. **Takaran Maksimum** menunjukkan tingkat pemupukan yang menyebabkan tercapainya produksi maksimum. Sedangkan **Takaran Optimum** adalah tingkat pemupukan unsur hara tertentu yang mengakibatkan tercapainya produksi tanaman yang optimum, dalam pengertian pertambahan produksinya sangat minimal bila ditambahkan lebih banyak unsur hara. Kedua jenis takaran pupuk ini berbeda antara unsur yang satu dengan unsur yang lain dan antara jenis tanah.

Pemupukan unsur hara dalam jumlah yang berlebih menyebabkan beberapa permasalahan di masa yang akan datang. Pertama, unsur hara pupuk dapat menyebabkan toksisitas, yang pada akhirnya mengakibatkan terhambatnya pertumbuhan dan perkembangan tanaman. Selain itu, pupuk biasanya membawa kontaminan. Misalnya, sebagian pupuk fosfat mengandung kontaminan yang di antaranya adalah Cd. Pemberian pupuk dalam jumlah berlebih dapat membawa kontaminan seperti logam berat. Tingginya tingkat pemupukan dapat menyebabkan akumulasi logam berat, yang bersifat **carcinogenic** (menyebabkan terjadinya kanker pada manusia). Pemberian berlebih juga dapat menyebabkan

inefisiensi pemupukan karena lebih tingginya masukan unsur hara tambahan untuk memperoleh pertumbuhan dan produksi yang sama.



Gambar 9.16. Pengaruh takaran pupuk terhadap pertumbuhan dan produksi tanaman.

9.7 Pembenh Tanah

Penbenah tanah (*Soil Conditioner*) seperti kapur, belerang, zeolit, dan bahan organik, sebenarnya juga merupakan pupuk. Namun, selain menyumbangkan unsur hara, penbenah tanah juga dapat mengakibatkan perbaikan lain di dalam sistem tanah. Bahan ini ditambahkan untuk mengubah tanah secara kimia, fisika, atau pun keduanya. Misalnya, kalsium karbonat (CaCO_3) adalah sebuah pupuk tunggal yang dapat menyumbangkan Ca^{2+} ke dalam air tanah. Namun demikian, pengaruhnya tidak hanya sekadar meningkatkan kandungan Ca di dalam tanah dan koloid tanah. Kalsit juga dapat meningkatkan pH tanah. Perbaikan kondisi pH oleh

Abdul Kadir Salam – 2020

kapur berdampak perbaikan yang sangat besar terhadap berbagai sifat dan proses kimia di dalam tanah. Dampak perbaikan semacam inilah sebenarnya yang menjadi tujuan terpenting dari pengapuran.

Naiknya pH tanah akibat pengapuran mengakibatkan pergeseran berbagai sifat kimia dan juga kehidupan biologi tanah. Dengan naiknya pH tanah, kehidupan jamur dan bakteri akan terpengaruh. Kehidupan jamur akan dominan pada pH relatif lebih rendah; sebaliknya kehidupan bakteri akan lebih dominan bila pH netral. Ini akan membawa konsekuensi terhadap populasi, aktivitas mikroorganisme dan juga produksi enzim. Seperti telah diungkapkan sebelumnya, peningkatan pH tanah juga akan meningkatkan ketersediaan unsur hara makro, khususnya P dan K, dan menurunkan ketersediaan unsur hara mikro seperti Zn dan Cu, kecuali Mo yang juga meningkat dengan meningkatnya pH tanah. Dengan alasan yang sama, pengasaman juga akan mengakibatkan pergeseran-pergeseran biokimia, karena pengasaman juga menyebabkan perubahan pH tanah. Dalam pengasaman, **Belerang** sering digunakan untuk menurunkan alkalinitas.

Gypsum (CaSO_4) dapat digunakan untuk tanah yang mengandung banyak Na, yang mengakibatkan memburuknya sifat fisika tanah karena terhambatnya flokulasi partikel-partikel tanah. Kalsium dalam gipsium akan menggantikan Na, yang kemudian berkombinasi dengan sulfat, sehingga memperbaiki sifat fisika tanah bila Na_2SO_4 telah tercuci dari tubuh tanah. Pembena tanah dari jenis apa pun juga dapat memberikan unsur hara yang diperlukan oleh tanaman. Misalnya, dalam contoh ini gipsium dapat memberikan Ca dan S, sedangkan dari contoh sebelumnya, kapur dapat memberikan Ca dan Mg

Bahan organik/*biosolid*/*biochar* atau arang alami seperti halnya pupuk hijau dan pupuk kandang yang diberikan ke dalam sistem tanah juga akan bertindak sebagai kondisioner (Buss dkk., 2012; Gupta dan Nayak, 2012) Jaringan organik secara umum mengandung seluruh unsur hara esensial bagi tanaman sehingga bila diberikan ke dalam tanah akan terdekomposisi dan membebaskan berbagai unsur hara, yang kemudian dapat dimanfaatkan kembali oleh tanaman. Bahan organik juga mengakibatkan perubahan-perubahan fisikokemis dan biologis. Kehadiran bahan organik tanah dapat meningkatkan dan memperkuat agregasi tanah sehingga memperbaiki porositas tanah dan meningkatkan daya serap tanah terhadap air, dan seterusnya. Perbaikan porositas tanah dan kadar air tanah akhirnya meningkatkan populasi dan aktivitas mikroorganisme tanah. Secara kimia, bahan organik juga meningkatkan KTK tanah, yang memiliki implikasi yang besar terhadap reaksi-reaksi kimia yang terjadi di dalam tanah. Namun demikian, jumlah unsur hara dan kecepatan pembebasannya dari bahan ini sangat tergantung pada jenis pupuk hijau dan pupuk kandang yang digunakan.

Abdul Kadir Salam – 2020

Pupuk hijau biasanya diberikan dalam bentuk kompos. Bahan dasar untuk pengomposan adalah sisa tanaman, sedikit tanah, pupuk N, dan sedikit kapur untuk mengimbangi pengasaman akibat pemberian pupuk N. Timbunan bahan organik dibiarkan untuk beberapa bulan dan dicampurkan ke dalam tanah. Proses pembusukan sisa tanaman oleh mikroorganisme sangat dipercepat oleh penambahan pupuk N dalam jumlah yang cukup.

Dalam pertanian organik, keperluan unsur hara tanaman dipasok oleh pelepasan unsur hara tanaman dari bahan organik seperti ini. Dengan demikian, hal negatif berkaitan dengan penggunaan pupuk buatan dapat dihindari. Praktik seperti ini dapat dilakukan di wilayah yang memiliki persediaan pupuk buatan sangat terbatas. Diaz dkk. (2011) melaporkan potensi penggunaan kotoran unggas sebagai sumber N untuk pertanaman jagung. Pengolahan jangka panjang dengan kotoran unggas dilaporkan meningkatkan mineralisasi C dan N, pengikatan unsur hara, dan kandungan bahan organik tanah. Dalam hal ini, Olah Tanah Minimum meningkatkan N, P, K, Ca, dan Mg lebih tinggi pada lapisan atas 0-5 cm; peningkatannya lebih merata sampai lapisan bawah dengan Olah Tanah Konvensional (Watts dkk., 2010).

Herrick dan Lal (1995) melaporkan bahwa introduksi kotoran sapi ke dalam tanah dapat meningkatkan porositas tanah dari 13 menjadi 21%, sorptivitas (laju infiltrasi) dari 34 menjadi 71 mm per jam, serta menurunkan pemadatan tanah, sehingga akhirnya dapat meningkatkan penyediaan unsur hara bagi tanaman. Kotoran sapi juga dapat meningkatkan ketersediaan unsur hara mikro seperti Cu, Fe, Mo, dan Zn (Richards dkk., 2011) serta populasi mikroorganisme, aktivitas enzim dehidrogenase, urease, β -glucosidase, fosfatase, dan arilsulfatase, sebagai akibat dari banyaknya fraksi labil bahan organik dalam kotoran sapi (Tejada dkk., 2010). Pupuk hijau dan pupuk kandang termasuk tinja (*'night soil'*) dapat juga dimanfaatkan untuk memasok unsur hara dan memperbaiki sifat-sifat tanah. Misalnya, penelitian terbaru (Banuwa dkk., 2003a;b; Banuwa dan Damai, 2003) mengungkap data seperti disajikan pada **Tabel 9.17**, yang merupakan hasil penelitian dengan menggunakan tinja bertakaran 0- 60 ton ha⁻¹.

Data pada **Tabel 9.17** menunjukkan bahwa penggunaan tinja dapat meningkatkan ketersediaan N, P, dan K dan juga pertumbuhan tanaman jagung. Namun demikian, dapat dilihat bahwa sangat sulit untuk memenuhi kebutuhan pangan bagi dunia bila pasokan unsur hara hanya diharapkan berasal dari sumber organik, karena bahan organik yang digunakan sangat voluminus, sehingga memerlukan penanganan khusus. Substitusi dengan bahan-bahan nir-organik masih tetap diperlukan, sehingga unsur hara asal bahan organik dan bahan nir-organik bersifat saling melengkapi.

Substitusi pupuk mineral dengan pupuk organik memperbaiki beberapa sifat kimia tanah yang penting untuk pertumbuhan tanaman (Yusnaini dkk., 2007). Substitusi pupuk kimia dengan bahan organik sampai 100% (20 ton ha⁻¹) memperbaiki pH tanah, C-Organik, N-Total, P-Tersedia, dan aktivitas beberapa jenis enzim. Misalnya, P-tersedia di dalam tanah yang sebelumnya 15.4 mg kg⁻¹ meningkat 64.7% dengan penambahan 100% pupuk kimia (300 kg Urea + kg SP-36 + 100 kg KCl ha⁻¹). Substitusi pupuk kimia dengan kotoran ayam sebanyak 50, 75, dan 100 % meningkatkan P-Tersedia masing-masing menjadi 228, 270, dan 300 mg kg⁻¹. Peningkatan juga terjadi pada C Organik dan N-Total dengan substitusi pupuk kimia dengan kotoran ayam atau pun pupuk hijau (*Glyricidium sp.*). Data selengkapnya disajikan pada **Tabel 9.18**. Ini menunjukkan bahwa bahan organik/biosolid merupakan sumber N, P, dan K bagi tanaman.

Tabel 9.17. Pengaruh tinja terhadap N, P, dan K, serta pertumbuhan dan produksi tanaman jagung*.

Parameter	Satuan	Tinja (ton ha ⁻¹)				
		0	15	30	45	60
N-Total	g kg ⁻¹	1.4	1.8	1.7	2.2	1.8
P-Tersedia	mg kg ⁻¹	0	3.1	3.3	3.4	3.5
K-dd	mg kg ⁻¹	7.5	8.1	8.3	9.0	11
Tinggi Tanaman	cm	13.1	13.6	13.7	14.0	14.6
Berat Kering Brangkasan Tanaman	g	6.7	7.1	8.7	9.5	9.8

*Diadaptasi dari Banuwa dkk. (2003a)

Tabel 9.18. Perubahan sifat tanah akibat substitusi pupuk kimia dengan pupuk organik*.

Perlakuan	pH	C-Org	N-Tot	P-Ters.	Alk. Fos.	β-Gluk.
		mg kg ⁻¹			μg p-Nitrofenol g ⁻¹ j ⁻¹	
Kontrol	4.63	10.2	1.2	15.4	50.9	189
Pupuk Organik 0%	4.37	13.2	1.2	64.7	39.8	228
Pupuk Hijau 50%	4.60	12.4	1.3	49.1	42.0	230
Pupuk Hijau 75%	4.59	12.1	1.3	38.6	46.5	231
Pupuk Hijau 100%	4.79	12.6	1.3	27.0	47.6	234
Kotoran Ayam 50%	6.33	16.3	1.6	228	189	164
Kotoran Ayam 75%	6.37	15.0	1.7	270	218	331
Kotoran Ayam 100%	6.61	19.5	1.9	300	239	225

*Diadaptasi dari Yusnaini dkk. (2007); *pengukuran setelah panen tanaman jagung

Selain meningkatkan N, P, dan K tanah, substitusi pupuk kimia dengan bahan organik juga memengaruhi pH tanah dan aktivitas enzim tanah. **Tabel 9.18** menunjukkan bahwa pH tanah meningkat dengan menurunnya porsi pupuk kimia dan meningkatnya substitusi dengan bahan organik berupa pupuk kandang maupun pupuk hijau. Demikian juga dengan aktivitas fosfatase alkalin dan β-glukosidase. Kedua fenomena ini menunjukkan bahwa bahan organik merupakan pembenah tanah yang baik sehingga mengakibatkan perbaikan sifat-sifat tanah lainnya. [~]

Daftar Pertanyaan Utama

1. Gambarkan neraca unsur hara hipotetik di dalam tanah subur dan tanah miskin! Apakah pupuk selalu diperlukan? Jelaskan!
2. Apa perbedaan yang terjadi pada neraca unsur hara di dalam tanah dalam sistem tertutup dan sistem terbuka? Jelaskan!
3. Apakah yang disebut unsur hara esensial? Sebutkan seluruh unsur hara tersebut berikut pengelompokannya berdasarkan jumlah relatif yang dibutuhkan tanaman dan jenis unsurnya!
4. Jelaskan sumber unsur hara C, H, O, dan N; juga unsur-unsur hara yang lainnya!
5. Apakah yang terjadi dalam proses fiksasi N?
6. Jelaskan peranan unsur-unsur hara di dalam sistem tanaman!
7. Dari manakah asal-usul unsur hara di dalam tanah? Jelaskan!
8. Sebutkan bentuk-bentuk unsur hara di dalam tanah dan derajat ketersediaannya bagi tanaman!
9. Sebutkan bentuk-bentuk unsur hara K di dalam tanah dan kecepatan ketersediaannya bagi tanaman!
10. Apakah yang dimaksud dengan K-Terfiksasi? Apakah yang disebut K-Tersedia bagi tanaman?
11. Apakah yang dimaksud dengan Klorosis, Nekrosis, dan Konsentrasi Kritis?
12. Bagaimana Konsentrasi Kritis dibuat?
13. Bagaimanakah cara menggunakan Konsentrasi Kritis dalam menentukan jenis dan jumlah unsur hara yang akan diberikan pada tanaman tertentu?
14. Jelaskan yang dimaksud dengan Deteksi Gejala Kekurangan dan Analisis Jaringan Tanaman!
15. Jelaskan Analisis Kimia Tanah, Uji Biologis, dan Uji Plus!
16. Bagaimanakah cara menggunakan analisis kimia dalam menentukan berbagai jenis bentuk unsur hara di dalam tanah? Jelaskan!
17. Bagaimanakah hubungan antara tanah, unsur hara, air, dan tanaman terkait dengan penyediaan unsur hara tanaman di dalam sistem tanah?
18. Bagaimana unsur hara dibebaskan dari padatan tanah? Reaksi apa saja yang terlibat? Jelaskan!
19. Bagaimana unsur hara yang telah dibebaskan dari padatan tanah bergerak menuju permukaan akar tanaman? Mekanisme apa saja yang terlibat? Faktor-faktor apa saja yang memengaruhinya? Jelaskan!
20. Bagaimana K larut dapat diukur?
21. Bagaimana cara mengukur K_{dd}?
22. Bagaimana unsur hara tersedia dapat diukur? Sebutkan beberapa pengekstrak untuk mengukur ketersediaan unsur hara di dalam tanah!
23. Bagaimanakah cara mengukur konsentrasi ion bebas di dalam air tanah? Jelaskan!
24. Apakah yang dimaksud dengan Uji Korelasi?

Abdul Kadir Salam – 2020

25. Sebutkan jenis-jenis pupuk dengan contoh-contohnya!
26. Bagaimana pemupukan dilakukan agar efisien baik dari segi teknis maupun dari segi ekonomis?
27. Bedakan kurva tanggapan tanaman terkait dengan Wilayah Defisiensi, Wilayah Cukup, dan Wilayah Toksisitas! Apa yang disebut dengan Konsumsi Mewah?
28. Apakah yang disebut Pupuk Biologis?
29. Apakah yang disebut dengan pembenah tanah (*Soil Conditioner*)? Mengapa kapur, belerang dan bahan organik dapat dijadikan sebagai bahan pembenah tanah? Jelaskan!

“Telah nampak KERUSAKAN di DARAT dan di LAUT disebabkan karena perbuatan manusia, supaya Allah merasakan kepada mereka sebagian dari akibat perbuatan mereka agar mereka kembali (ke jalan yang benar)” (QS Ar-Rum [30]:41)

Bab X:

DEGRADASI DAN KONSERVASI TANAH

10.1 Tanah adalah Sumberdaya Alam yang Sangat Berharga

10.2 Degradasi dan Konservasi Tanah

Daftar Pertanyaan Utama

10.1 Tanah adalah Sumberdaya Alam yang Sangat Berharga

Seperti telah didiskusikan sebelumnya, tanah adalah sebuah sumberdaya alam yang tidak dapat diperbaharui. Sebidang tanah terbentuk melalui proses yang telah berjalan bertahun-tahun di bawah pengaruh berbagai faktor genesis tanah. Dari tanah manusia memperoleh unsur hara yang dimanfaatkan oleh tumbuhan untuk memproduksi berbagai jenis makanan yang akhirnya dimakan oleh hewan dan manusia. Dengan tanah yang subur, kebutuhan manusia dapat dengan lebih mudah terpenuhi. Namun dengan tanah yang tidak subur, manusia akan menghadapi berbagai persoalan dan kesulitan yang tidak sedikit untuk memperoleh makanan. Tanah yang tidak subur adalah malapetaka bagi kehidupan, karena dapat menyebabkan kelaparan dan kepunahan generasi

Abdul Kadir Salam – 2020

kehidupan. Tanah yang subur jika tidak dipelihara dengan baik dapat berubah menjadi tanah yang tidak subur dan menimbulkan malapetaka yang niscaya terjadi. Beberapa contoh telah diungkapkan dalam literatur, di antaranya adalah cerita tentang tanah padang rumput yang karena tidak dikelola dengan baik telah menyebabkannya berubah menjadi tanah gurun pasir.

Oleh karena itu, tanah yang kita miliki harus dipelihara dengan baik. Ilmu yang mempelajari tentang teori dan teknik untuk memelihara tanah disebut **Konservasi Tanah**. Pemeliharaan yang dimaksud adalah berbagai usaha cerdas yang dilandasi oleh pemikiran dan hasil penelitian akademik yang dilakukan terhadap tanah dengan tujuan agar sifat-sifat dan fungsi tanah tidak mengalami degradasi. Sifat-sifat tanah ini mencakup sifat fisika, sifat kimia, dan sifat biologi. Sifat fisika tanah mencakup struktur dan porositas tanah, kadar air tanah, temperatur tanah, dan lain-lain. Sifat kimia tanah mencakup pH, kandungan bahan organik, KTK, KB, konsentrasi unsur hara makro dan mikro, dan lain sebagainya. Sedangkan sifat biologi mencakup jenis, populasi, dan aktivitas organisme tanah, khususnya yang sangat berguna untuk pemeliharaan kesuburan tanah pertanian.

Perubahan pada satu atau beberapa sifat di atas telah terbukti merusak fungsi tanah. Misalnya, terjadinya pemadatan tanah akan mengakibatkan menurunnya porositas, infiltrasi, dan perkolasi air di dalam tubuh tanah. Akibatnya, berbagai sifat kimia tanah seperti potensial redoks, pH, dan kandungan bahan organik juga mengalami perubahan. Karena difusi O_2 dan CO_2 terhambat, kehidupan organisme tanah juga terganggu, sehingga produksi enzim dan proses dekomposisi bahan organik akan melambat. Alhasil, terjadinya pemadatan tanah dapat mengakibatkan rentetan perubahan sifat dan reaksi dalam sistem tanah, yang berkaitan secara langsung atau tidak langsung dengan proses pemadatan tersebut. Keterkaitan ini akhirnya dapat mengubah status kesuburan tanah.

10.2 Degradasi dan Konservasi Tanah

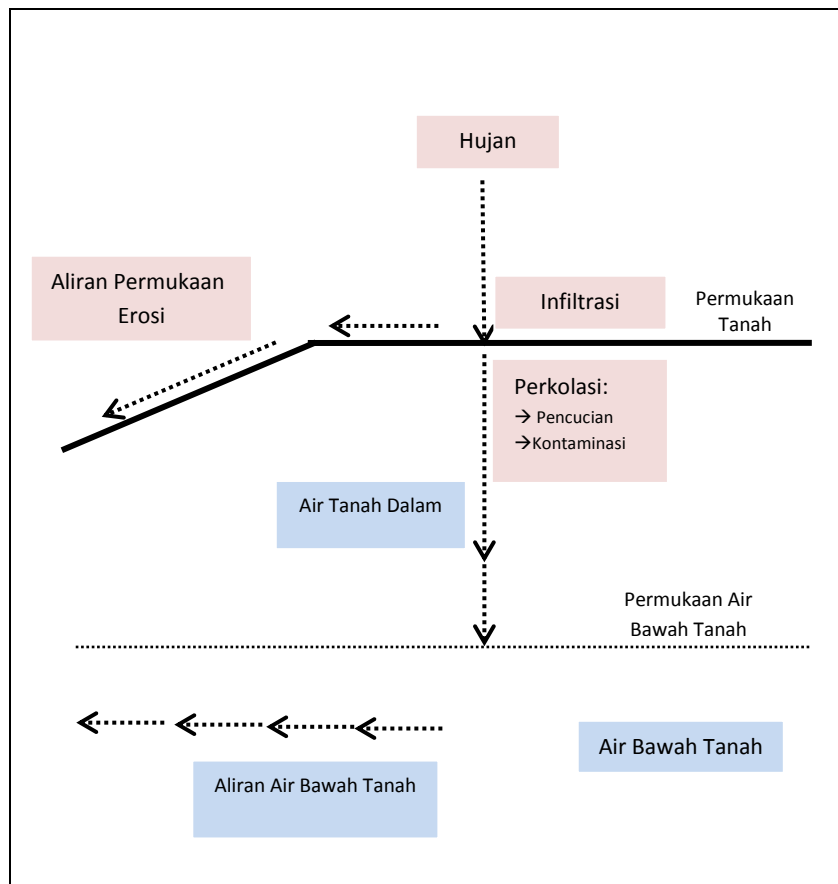
Tergantung pada derajat intensitasnya, berbagai proses dapat merusak sistem tanah, baik terkait sifat fisika, sifat kimia, maupun sifat biologi tanah. Proses-proses ini umumnya dapat dibagi menjadi dua kelompok, yaitu proses-proses alami dan proses-proses antropogenik. Proses alami di antaranya adalah: erosi, pencucian, pelapukan mineral, pelapukan organik, dan pemadatan alami. Proses-proses antropogenik di antaranya adalah: pemadatan antropogenik dan

pencemaran oleh limbah industri. Kedua kelompok proses ini dapat saling berkaitan dan dapat mengakibatkan serta mempercepat proses perusakan tanah.

a. Erosi Tanah

Erosi Tanah merupakan salah satu proses alami yang menjadi masalah besar di sebagian wilayah tropika, khususnya karena kelerengan lahan yang bervariasi dan curah hujan yang relatif tinggi. Proses erosi terjadi karena tubuh tanah tidak dapat lagi menyerap seluruh air hujan, sehingga air yang kemudian tergenang mengalir di permukaan tanah (**Gambar 10.1**). Bila hujan datang, air mestinya akan dengan mudah memasuki tubuh tanah melalui pori tanah dengan proses **Infiltrasi**, yaitu peristiwa masuknya air ke dalam tubuh tanah melalui pori-pori tanah. Di dalam tubuh tanah, air kemudian mengalami **Perkolasi**, yaitu peristiwa Bergeraknya air di dalam tubuh tanah melalui saluran pori tanah. Bila air hujan cukup banyak, sebagian air akan terus bergerak menuju permukaan **Air Bawah Tanah** (*ground water*). Bila penyerapan air oleh tanah (melalui infiltrasi dan perkolasi) lebih lambat daripada kecepatan turunnya air hujan, misalnya karena porositas tanah terlalu rendah atau seluruh pori tanah telah terjenuhi oleh air, air hujan akan mulai tergenang di permukaan tanah. Bila air di permukaan tanah telah menumpuk dalam jumlah banyak, air akan mengalami **Limpasan Permukaan**, yaitu peristiwa mengalirnya air di permukaan tanah dari tempat yang lebih tinggi ke tempat yang lebih rendah (**Gambar 10.1**). Air limpasan dapat membawa serta partikel-partikel tanah yang dikikis dari permukaan tanah yang terlewat oleh gerakan air.

Gerakan air dengan energi kinetik yang relatif tinggi dapat melepaskan partikel-partikel tanah dan mengangkutnya ke tempat lain yang lebih rendah dengan membawa serta berbagai jenis unsur hara, khususnya bila bahan yang diangkut adalah bahan organik dan liat tanah. Proses ini menipiskan lapisan dan volume tanah bagian atas, yang penting untuk penyimpanan air dan perkembangan akar tanaman. Air limpasan permukaan dapat terlihat keruh atau jernih, tergantung pada bahan suspensi yang ada di dalamnya. Baik keruh atau pun jernih, air limpasan permukaan sebenarnya semuanya membawa berbagai bahan, mencakup bahan organik, liat, dan unsur hara tanaman, yang dibawa oleh air limpasan dari permukaan dan lapisan atas tanah. Proses penggerusan lapisan atas tanah oleh limpasan air disebut **Erosi Tanah**.



Gambar 10.1. Proses terjadinya erosi tanah.

Telah dilaporkan bahwa sedimen dalam air limpasan permukaan mengandung unsur hara dan bahan kimia lainnya dalam jumlah tinggi, misalnya N, P, Cd dan Atrazin (Sharpley dkk., 1991a; Korentajer dkk., 1993; Seta dkk., 1993). Gachene dkk. (1997) juga melaporkan bahwa sedimen hasil erosi kaya dengan P dan Na, masing-masing 4-10 kali lipat untuk P dan 2-3 kali lipat untuk Na dibandingkan dengan tanah asalnya. Kuantitas Cd dalam sedimen dilaporkan lebih tinggi dengan meningkatnya kemiringan lahan yang tererosi (Korentajer dkk., 1993). Proses erosi juga dapat mengangkut partikel ringan dengan kerapatan jenis rendah berupa

bahan organik yang berasosiasi dengan bahan mineral sehingga menurunkan kandungan bahan organik tanah (Cheng dkk., 2010). Di beberapa wilayah di Indonesia, proses erosi dapat menurunkan ketebalan lapisan atas tanah sampai beberapa cm hanya dalam waktu beberapa tahun tergantung pada kecepatan erosi. Sebaliknya, di tanah padang pasir, dengan curah hujan yang relatif rendah, proses erosi berlangsung dengan kecepatan yang rendah.

Massa tanah yang diangkut dari lahan biasanya diendapkan di lahan lain yang lokasinya lebih rendah atau dibawa masuk ke dalam aliran sungai atau dasar danau menjadi sedimen. Bila endapan tersebut terjadi di lahan pertanian maka sedimen tersebut akan menyuburkan tanah. Hal seperti ini dapat disaksikan misalnya di Jawa Barat bagian Utara, yang merupakan lahan dengan tanah aluvial yang sangat subur dan sampai saat ini masih relatif terpelihara dan merupakan pusat produksi padi nasional. Sebaliknya, bila mengendap di dasar pelabuhan, sungai atau waduk, maka bahan tersebut dapat menimbulkan masalah besar. Misalnya, Waduk Way Rarem di Lampung, yang seharusnya dirancang efektif sampai dengan 2010, pada tahun 1999 sudah mengalami pendangkalan yang sangat nyata, sehingga masa efektifnya berkurang lebih dari 10 tahun.

Berbagai proses atau aktivitas antropogenik dapat meningkatkan terjadinya proses erosi. Pembukaan hutan untuk wilayah pertanian umumnya dapat mempercepat erosi. Pembukaan hutan berarti mengurangi penutup tanah, sehingga tanah memperoleh dampak yang lebih besar dari benturan oleh butiran air hujan, sehingga rentan terhadap proses erosi. Pengolahan tanah secara intensif juga dapat mengakibatkan tidak mantapnya agregat tanah sehingga tanah lebih mudah diangkut oleh air.

Erosi juga terjadi lebih cepat pada tanah dengan agregat yang lemah sehingga mudah hancur dan mudah diangkut oleh air yang mengalir. Namun demikian, agregat tanah yang cukup mantap juga dapat dihancurkan oleh benturan air hujan dengan energi kinetik yang cukup tinggi, khususnya bila permukaan tanah tidak terlindungi oleh tajuk tanaman atau mulsa. Menurut perkiraan, butiran air hujan dengan kecepatan sekitar 32 km j^{-1} setebal 12.5 cm ha^{-1} memiliki energi kinetik sangat besar, yaitu 4.4 juta joule. Proses erosi juga berkaitan dengan kelerengan. Tanah yang datar tererosi relatif lambat sebab kecepatan limpasan air di sini rendah. Dengan bertambahnya derajat kelerengan, kecepatan limpasan permukaan dan erosi juga meningkat (Singer dan Munns, 1987).

Erosi oleh air dibagi menjadi Erosi Parit, Erosi Alur, dan Erosi Lembar. **Erosi Parit** (*Gully Erosion*) terjadi bila air terkonsentrasi dalam satu saluran dan dapat memperdalamnya secara cepat. **Erosi Alur** (*Rill Erosion*) terjadi karena aliran air terkonsentrasi dalam alur kecil yang tidak dalam. Sedangkan **Erosi Lembar** (*Sheet*

Erosion) adalah pengikisan permukaan tanah oleh air tanpa membentuk saluran (Singer dan Munns, 1987).

Selain oleh air, erosi tanah juga dapat terjadi oleh angin. Erosi tanah oleh angin terjadi pada saat angin memiliki energi kinetik cukup tinggi untuk memindahkan partikel tanah di permukaan tanah. Bila tanah tidak ditanami, permukaannya tidak kasar, atau tanpa penutup sisa tanaman atau mulsa, khususnya pada musim kering yang berangin dengan kecepatan tinggi, partikel-partikel tanah dapat berpindah tempat karena energi kinetik angin. Tanah yang terbawa oleh angin akhirnya mengendap dan menutupi parit dan ladang serta mengganggu berbagai fasilitas. Proses erosi oleh angin ini juga membawa partikel lapisan atas tanah yang subur sehingga dengan berjalannya waktu proses erosi angin dapat menipiskan lapisan atas tanah dan menurunkan tingkat kesuburannya. Penutupan permukaan tanah sekitar 4% dapat menurunkan erosi angin sampai dengan 15%; gundukan 50-70 mm dapat mengurangi kehilangan massa tanah sampai dengan 98% (Fryrear, 1995).

Erosi oleh angin dibagi menjadi dua kelompok, yaitu **Rayapan Permukaan** (*Surface Creep*) dan **Salto** (*Saltation*). *Surface Creep* mengakibatkan partikel tanah, khususnya yang berukuran besar, merayap dan menggelinding di permukaan tanah. *Saltation* mengakibatkan partikel tanah berpindah dengan meloncat-loncat di permukaan tanah. Partikel-partikel ini, yang umumnya berukuran pasir, dapat menghantam tanaman secara bertubi-tubi dan merusak tanah (Singer dan Munns, 1987; Harpstead dkk., 1988).

Selain kedua proses erosi oleh angin ini, dapat juga terjadi proses erosi lain yang disebabkan oleh angin, yaitu **Suspensi** (*Suspension*). Partikel-partikel tanah yang halus seperti liat dapat tersuspensi di dalam udara dan menghasilkan kabut berdebu yang mengakibatkan partikel-partikel tanah tersebut terangkut jauh dari tempatnya semula. Karena partikel ini mengandung unsur hara, liat, debu, dan bahan organik, proses ini sangat merugikan ditinjau dari sudut kesuburan tanah. Selain itu, hasil erosi suspensi yang mengendap di suatu tempat dapat menimbulkan berbagai gangguan yang merugikan.

Sharratt (2011) melaporkan bahwa partikel tanah dengan diameter $\leq 32 \mu\text{m}$ diangkut terutama dengan cara Suspensi, partikel tanah dengan diameter 33-45 μm diangkut dengan cara Salto dan Suspensi, dan partikel tanah dengan ukuran diameter $> 45 \mu\text{m}$ diangkut terutama dengan cara Rayapan Permukaan dan Salto. Ukuran partikel tanah yang diangkut melalui erosi angin umumnya meningkat dengan meningkatnya kecepatan angin.

Selain oleh air dan angin, massa tanah juga dapat berpindah dari satu tempat ke tempat lainnya yang lebih rendah sebagai akibat gaya gravitasi. Misalnya, tanah

yang longsor dari bagian atas akan bergerak ke bagian yang lebih rendah. Proses erosi seperti ini tidak hanya dapat memindahkan sebagian dari tanah pertanian tetapi juga dapat menghancurkan jalan, bangunan, dan fasilitas lain yang penting. Erosi tanah juga dapat terjadi secara antropogenik, misalnya sebagai akibat dari berkurangnya topsoil tanah untuk pembuatan batu bata (Manik dkk., 1997).

Daya tahan tanah terhadap erosi berbeda tergantung pada beberapa hal, yang di antaranya adalah: struktur, tekstur, kecepatan infiltrasi, dan permeabilitas tanah. Partikel berukuran debu (0.002 – 0.050 mm) cenderung lebih mudah dilepaskan dan diangkut, sedangkan pasir (0.050 – 2 mm) terlalu besar, sehingga lebih sulit diangkut. Partikel liat (< 2 μ m) biasanya berikatan satu dengan lainnya sehingga berperilaku seperti partikel besar, yang lebih sulit diangkut. Partikel-partikel tanah yang terikat satu dengan yang lainnya dalam bentuk agregat umumnya relatif stabil, sehingga biasanya sulit dilepaskan dan diangkut. Partikel tanah dapat menyatu diikat oleh bahan organik, sesquioksida, dan liat sebagai perekat. Tanah yang berbahan organik atau berliat tinggi juga lebih sulit tererosi daripada tanah dengan bahan organik dan berliat rendah (Lado dkk., 2004). Struktur tanah yang baik dan tekstur sedang bahkan dapat meningkatkan kecepatan infiltrasi, sehingga mengurangi limpasan permukaan dan erosi tanah.

Kecepatan erosi tanah dapat diduga, salah satunya, dengan menggunakan Persamaan Umum Kehilangan Tanah atau USLE (*Universal Soil-Loss Equation*), yang secara matematika dapat ditulis sebagai berikut (Singer dan Munns, 1987):

$$A = RKLSCP \dots\dots \text{Pers. 10.1}$$

dengan A adalah rata-rata massa tanah yang hilang akibat erosi di suatu lokasi dalam jangka panjang, R adalah faktor rata-rata curah hujan dan limpasan permukaan jangka panjang, K adalah indeks erodibilitas, L adalah faktor panjang lereng, S adalah faktor sudut kelerengan, C adalah faktor penutup tanah, dan P adalah faktor praktek kontrol erosi.

Nilai K merupakan angka hasil kombinasi dari beberapa sifat tanah yang memengaruhi tanggapan tanah terhadap hujan dan limpasan permukaan, yaitu: debu dan pasir berukuran halus, pasir dengan ukuran lebih besar, kandungan bahan organik, serta struktur dan permeabilitas tanah dari lapisan tanah yang kurang permeabel. Debu dan pasir halus adalah yang paling mudah bergerak. Pasir kasar (0.1-2 mm) kurang dapat bergerak. Meningkatnya bahan organik mengurangi erodibilitas karena meningkatkan agregasi tanah. Tekstur tanah dan permeabilitas berkaitan dengan kecepatan terjadinya genangan dan awal terjadinya limpasan

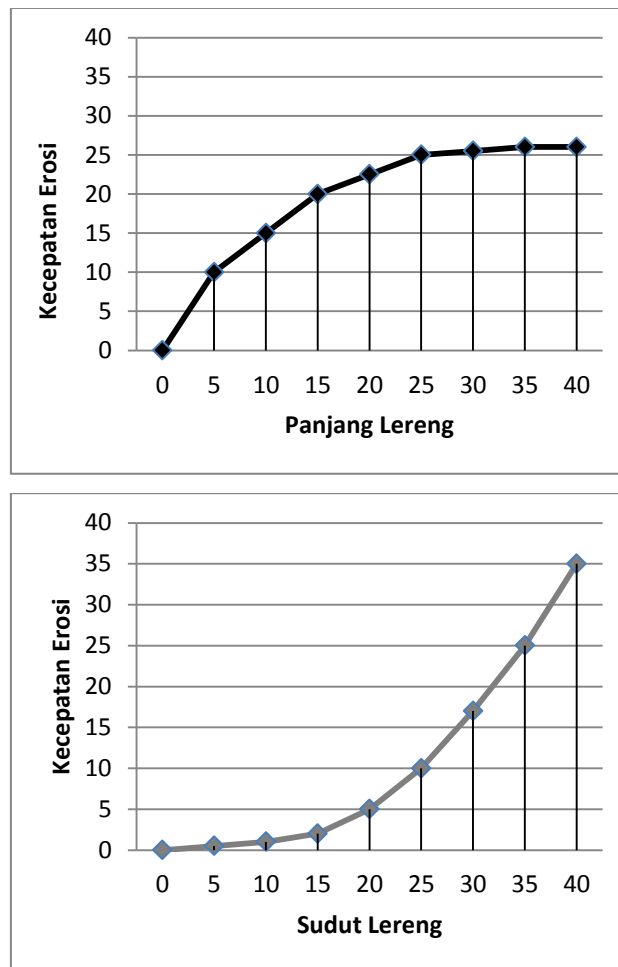
permukaan. Horizon yang paling tidak permeabel menentukan hidrologi tanah. Tanah dengan struktur kuat tidak mudah terlepas dan erodibilitasnya rendah.

Kecepatan aliran air tergantung pada kecuraman dan panjang lereng. Hubungan antara kehilangan tanah dengan panjang (L) dan sudut lereng (S) diperlihatkan pada **Gambar 10.2**. Gambar tersebut dengan jelas memperlihatkan bahwa kedua parameter tersebut sangat berpengaruh terhadap kecepatan erosi, namun menunjukkan perbedaan. Kecepatan erosi meningkat dengan meningkatnya L atau pun S. Kecepatan erosi meningkat secara eksponensial dengan meningkatnya sudut lereng, dan secara kuadratik dengan meningkatnya panjang lereng. Ini menunjukkan juga bahwa kelerengan lebih besar pengaruhnya daripada panjang lereng.

Penggunaan tanaman penutup tanah (C) merupakan salah satu cara untuk mengontrol kehilangan tanah. Bila tanah tertutup, butiran air hujan dan limpasan air tidak dapat melepaskan partikel tanah. Faktor P dalam USLE adalah nisbah (dengan nilai 0-1) antara tanah yang hilang dari petak tanah dengan praktik konservasi tertentu dengan petak tanah kontrol. Praktek konservasi tersebut mencakup pengolahan kontur, pembuatan teras, dan alur air berupa rumput dan lain-lain. Bila praktik konservasi tidak dilakukan maka nilai P adalah 1; sebaliknya bila praktek konservasi tanah dilaksanakan secara sempurna maka nilai P adalah 0.

Bila semua angka tersebut telah diperoleh, maka nilai A dapat dengan mudah dihitung. Nilai A memberikan dugaan rata-rata tahunan kehilangan tanah oleh erosi dari lahan. Angka ini dapat digunakan untuk menentukan praktek konservasi tanah yang diperlukan dan tingkat C dan P yang diperlukan untuk menurunkan kehilangan tanah ke tingkat yang diinginkan. Penelitian terkait dengan faktor C dan P telah banyak dilakukan, sehingga terdapat berbagai pilihan untuk mengelola tanah dengan tingkat erosi minimum.

Erosi tanah harus dikontrol secara efektif agar tidak menimbulkan degradasi tanah. Pengontrolan erosi tanah merupakan cara yang lebih baik daripada mereklamasi tanah yang telah rusak akibat proses erosi. Karena partikel tanah dapat terangkut oleh air limpasan bila terlepas dari agregatnya, maka usaha yang harus dilakukan untuk menekan erosi adalah menghindari terjadinya kerusakan agregat tanah yang mengakibatkan terlepasnya partikel tanah dari agregatnya. Dalam kaitannya dengan usaha ini, perlu diketahui juga bahwa kemantapan agregat tanah sangat berkaitan dengan kandungan bahan organik tanah yang tinggi, yang dapat merangsang agregasi dan peningkatan porositas tanah sehingga dapat mengalirkan air dengan lancar. Penutup tanah berupa tanaman atau sisa tanaman juga dapat mengurangi energi kinetik butiran air hujan sehingga dampaknya terhadap agregat tanah menurun.



Gambar 10.2. Hubungan kehilangan tanah akibat erosi dengan panjang dan sudut kelerengan (Diadaptasi dari Singer dan Munns, 1987).

Selain usaha di atas, mengontrol erosi yang terjadi di lereng bukit dapat dilakukan dengan menurunkan kecepatan aliran air sehingga mengurangi energi kinetiknya. Dengan cara ini, penggerusan agregat tanah di permukaan tanah dapat

Abdul Kadir Salam – 2020

dikurangi. Penurunan kecepatan aliran air juga memberikan waktu yang lebih panjang bagi air untuk dapat memasuki pori tanah. Cara yang biasa dilakukan di Indonesia untuk melakukan usaha ini adalah dengan membagi lereng menjadi beberapa bagian untuk dibuat teras. Cara ini telah lama dilakukan untuk pertanaman padi di Indonesia. Cara ini dapat secara efektif menurunkan kecepatan aliran air sehingga menurunkan proses erosi.

Untuk mengendalikan proses erosi akibat aliran air yang terkonsentrasi pada alur atau parit, rerumputan dapat ditanam di dasar parit atau alur. Rerumputan dapat mengurangi pendalaman alur atau parit karena sistem perakaran rumput relatif padat sehingga tahan terhadap proses erosi parit. Perakaran rerumputan dapat secara efektif mengikat partikel tanah dan menyebabkan tanah lebih tahan.

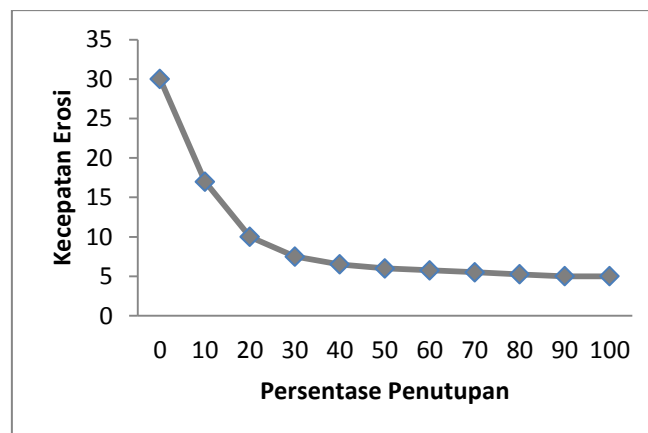
Secara umum, erosi dapat dikontrol dengan menggunakan Cara Penutupan Tanah, Cara Mekanik, atau Cara Olah Tanah (Singer dan Munns, 1987). Penggunaan **Vegetasi Penutup** (salah satu **Cara Penutupan Tanah**) merupakan cara yang terbaik. Hal ini karena vegetasi penutup dapat mengurangi benturan air hujan sehingga tidak melepaskan partikel tanah. Selain itu, penutup yang terletak langsung di permukaan tanah dapat menurunkan kecepatan aliran air di atas tanah. Penutup tanah seperti ini sebenarnya dapat berupa sesuatu yang hidup atau mati, tinggi atau rendah, tanaman, mineral, buatan atau alami, sepanjang dapat mengurangi kekuatan jatuhnya butiran air hujan.

Contoh hubungan penurunan kehilangan tanah akibat erosi dan penutupan tanah dengan vegetasi penutup disajikan pada **Gambar 10.3**. Terlihat jelas bahwa penutupan tanah secara signifikan menurunkan kecepatan erosi tanah. Semakin tinggi persentase penutupan tanah akan semakin efektif penutup tanah dalam mengurangi kecepatan erosi. Benkoli dkk. (1993) melaporkan bahwa kehilangan massa tanah dapat dikurangi sampai sekitar 40% dengan 60% penutupan tanah dengan sisa tanaman atau 85% dengan kerikil. Penutupan dengan sisa tanaman dilaporkan lebih efektif dalam menurunkan tingkat erosi tanah dibandingkan penutupan dengan kerikil.

Vegetasi hidup dengan akarnya di dalam tanah memiliki keuntungan lebih besar dibandingkan dengan mulsa yang hanya menutupi permukaan tanah. Akar tanaman mengikat partikel tanah secara fisika. Eksudat akar tanaman juga merangsang proses agregasi. Setelah mati, akar tanaman akan terdekomposisi dan meningkatkan kandungan humus di dalam tanah dan meningkatkan stabilitas agregat. Akar tanaman menciptakan pori, yang dapat meningkatkan infiltrasi air. Akar tanaman juga menyerap air sehingga dapat menjaga proses masuknya air ke dalam tanah. Daun tanaman mengurangi limpasan permukaan dan erosi bila

berkontak langsung dengan permukaan tanah. Bila terpisah dari permukaan tanah, kemanfaatan ini berkurang.

Mulsa adalah Cara Penutupan Tanah yang lain. Penggunaan mulsa menghambat benturan butiran air hujan dan memperlambat limpasan permukaan. Mulsa yang paling baik adalah yang tersedia dalam jumlah banyak, tidak mengganggu aktivitas pertanian, dan tidak merupakan sumber penyakit, benih gulma, dan hama. Jerami padi adalah salah satu bahan mulsa yang sangat bagus. Selain jerami padi, beberapa bahan mulsa lainnya adalah kertas, plastik, tetelan kayu, dan batu.



Gambar 10.3. Hubungan antara kehilangan tanah akibat erosi dengan penutupan tanah (Diadaptasi dari Singer dan Munns, 1987).

Dalam **Cara Mekanik**, erosi dapat dikontrol dengan **Terasering**, **Strip Cropping**, dan **Contour Cropping**. Selain itu, **Cara Olah Tanah**, di antaranya teknik Olah Tanah Konservasi (OTK) yang mencakup Tanpa Olah Tanah (TOT) dan Olah Tanah Minimum (OTM) juga dapat digunakan untuk mengurangi erosi. Dalam teknik ini, pengolahan tanah tidak atau sedikit dilakukan, dan sisa tanaman dikembalikan untuk menutup permukaan tanah. Dengan cara ini erosi dapat diturunkan. Namun

demikian, **OTK** memiliki beberapa kekurangan, di antaranya adalah tidak dapat dikendalikannya gulma tanpa menggunakan herbisida, yang dapat menjadi bahan pencemar bagi lingkungan. Selain itu, penambahan pupuk sulit untuk dilakukan dengan kaidah yang benar. Misalnya, urea yang semestinya diterapkan dengan cara injeksi ke dalam tanah harus dilakukan dengan cara tabur, sehingga dapat mengurangi keefisienannya. Namun demikian, untuk kondisi tertentu teknik ini sangat baik, khususnya dalam rangka menurunkan kecepatan erosi.

Pengontrolan proses erosi oleh angin adalah dengan menurunkan energi kinetik angin, sama halnya dengan menurunkan energi kinetik butiran air hujan. Salah satu cara yang paling efektif adalah dengan menggunakan vegetasi penutup, yang berupa tanaman hidup atau sisa tanaman (Sterk dan Spaan, 1997). Cara lain adalah dengan menjaga agar permukaan tanah berada dalam keadaan kasar. Permukaan demikian dapat menghambat pergerakan partikel tanah, bahkan dapat menghentikannya sama sekali.

Selain cara di atas, *Strip-Cropping* dapat digunakan untuk menurunkan gerakan partikel tanah oleh angin. Cara ini dilakukan dengan menggunakan satu baris tanaman selain tanaman utama. Tanaman ini diharapkan dapat menghambat gerakan angin. Pemecah angin (*wind-break* atau *shelterbelt*) juga banyak digunakan untuk memecah atau menurunkan kecepatan angin (Singer dan Munns, 1987). Cara ini dilakukan dengan menanam beberapa barisan pohon, semak, atau rerumputan tertentu pada jarak yang diatur di antara tanaman utama, yang berfungsi untuk mengurangi kecepatan gerak partikel tanah. Jarak antara barisan pemecah angin ini dibuat tidak terlalu jauh agar fungsinya dapat berjalan secara efektif.

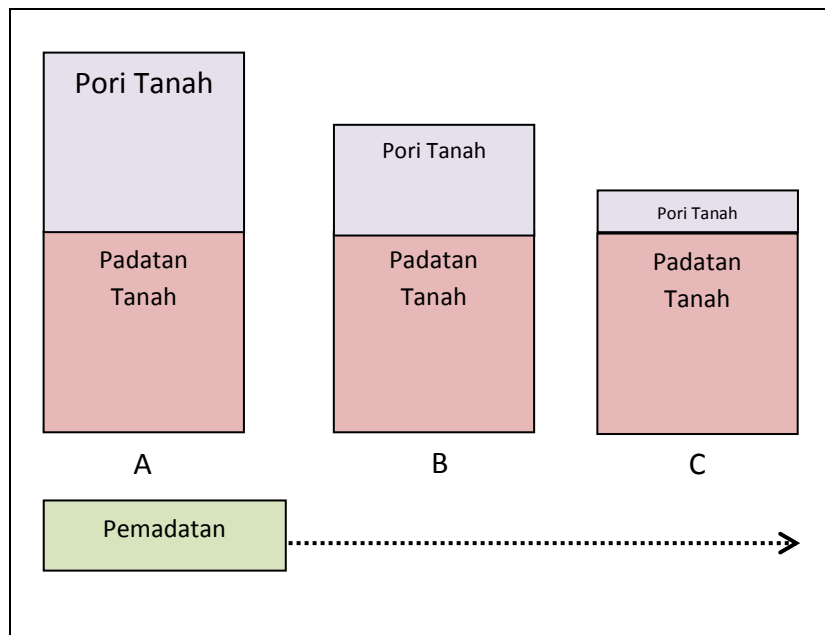
Pemantap agregat tanah juga dapat digunakan untuk mengurangi laju erosi oleh angin. Ini mencakup bahan kimia yang menyebabkan partikel tanah untuk beragregasi, bahan organik yang berfungsi sebagai perekat dan pemantap agregat, dan air. Bahan organik dapat ditambahkan dalam bentuk sisa-sisa tanaman atau kotoran binatang ternak. Di wilayah yang tidak memiliki sumber bahan organik ini, dapat juga digunakan kompos sampah kota (Annabi dkk., 2006). Air dapat secara sementara memantapkan agregat tanah sampai mengering dan sampai kembali rentan terhadap proses erosi.

b. Pemadatan Tanah

Kepadatan tanah ditunjukkan oleh Kerapatan Isi (ρ_b), yang merupakan ukuran massa tanah per satuan volume total tanah. Semakin tinggi ρ_b , tanah akan semakin

padat. Bila susunan partikel tanah dalam agregat dipadatkan, maka volume tanah akan menurun dan massa tanah per satuan volume tanah meningkat. Kerapatan isi tanah dapat meningkat dari angka yang umum, yaitu 1.32 g cm^{-3} menjadi sangat tinggi setingkat dengan kerapatan partikel tanah (ρ_s) bila seluruh pori tanah menghilang, yaitu sekitar 2.7 g cm^{-3} . Ini secara khusus diakibatkan oleh mengecilnya pori-pori tanah secara signifikan. Proses ini dinamakan **Pemadatan** (Kompaksi) (**Gambar 10.4**).

Secara struktural, penurunan volume tanah atau mengecilnya ukuran pori tanah diakibatkan oleh semakin rapatnya penyusunan partikel-partikel tanah di dalam agregat tanah sehingga semakin sedikit ruang di antara partikel tanah atau di antara agregat tanah yang tersisa. Dengan proses seperti ini, ρ_b tanah dalam Kondisi C lebih tinggi daripada dalam Kondisi B dan pada Kondisi B lebih tinggi daripada dalam Kondisi A (**Gambar 10.4**).



Gambar 10.4. Pemadatan tanah.

Pemadatan tanah terjadi bila beban di atas permukaan tanah terjadi sedemikian rupa sehingga mengubah susunan partikel-partikel tanah menjadi lebih rapat dan rongga-rongga di antaranya menjadi sangat menyempit. Selain faktor beban yang relatif tinggi dan berulang, faktor terpenting yang memengaruhi pemadatan tanah adalah kadar air saat beban tersebut diterapkan. Partikel-partikel tanah dalam keadaan kering lebih mudah untuk bergeser satu dengan yang lainnya. Pada kadar air yang lebih tinggi, kerapatan isi tanah sulit meningkat karena air sulit dipadatkan. Oleh karena itu, pemadatan tanah dapat dihindari salah satunya dengan menjaga agar kadar air tanah tetap tinggi.

Proses pemadatan tanah dapat mengganggu pertumbuhan tanaman dan perkembangan tanaman sebab tanaman umumnya memerlukan porositas total > 50% (Afandi dkk., 1997b). Tanah seperti ini memiliki kerapatan isi 1.32 Mg m^3 dan subsoil yang padat 1.60 Mg m^3 . Salah satu pengaruh negatif pemadatan tanah terhadap pertumbuhan tanaman adalah menyulitkan perkembangan akar. Selain itu, banyak sekali sifat kimia dan biologi tanah yang akan terpengaruh oleh proses pemadatan, di antaranya adalah ketidakseimbangan pasokan O_2 dari atmosfer dan pengeluaran CO_2 ke atmosfer. Ini akan menyebabkan terhambatnya respirasi di dalam tubuh mikroorganisme, makroorganisme, dan akar tanaman; serta terhambatnya proses dekomposisi bahan organik tanah. Hal ini akan mengakibatkan penurunan populasi dan aktivitas biologi tanah dan seluruh proses yang terkait dengan perubahan ini.

Pengelolaan air tanah juga akan sangat terpengaruh oleh terjadinya pemadatan tanah. Air hujan tidak dapat disimpan dengan baik di dalam tanah karena infiltrasi air terhambat oleh rendahnya porositas tanah. Air akan cenderung tergenang dan mungkin mengalami limpasan ketimbang mengalami infiltrasi dan perkolasi. Akibatnya, simpanan air di dalam tanah menurun, sedangkan erosi tanah meningkat, sehingga tanah yang sebelumnya subur dapat berubah status menjadi tanah tidak subur. Simpanan air di Air Bawah Tanah juga akan sangat terpengaruh karena hanya sedikit saja air yang mengalami infiltrasi dan perkolasi menembus tubuh tanah serta mencapai Air Bawah Tanah. Akibatnya, irigasi lahan dengan menggunakan Air Bawah Tanah sebagai sumbernya akan terganggu.

Karena menimbulkan berbagai masalah, khususnya dalam pengelolaan tanah untuk pertanian dan lingkungan, pemadatan tanah harus dihindari dan kepadatan tanah harus diturunkan dengan menurunkan kerapatan isi tanah. Salah satu usaha untuk menurunkan kerapatan isi tanah adalah dengan **Pengolahan Tanah**. Pengolahan tanah akan merenggangkan susunan partikel-partikel tanah sehingga rongga-rongga di antaranya dan di antara agregat-agregat tanah melebar. Proses ini akan menurunkan kerapatan isi dan meningkatkan porositas total tanah.

Perubahan ini akan mengembalikan kesetimbangan O_2 dan CO_2 antara udara tanah dan udara atmosfer, sehingga memudahkan biologi tanah untuk melakukan aktivitasnya dengan optimal. Simpanan air dalam tanah (Kadar Air Tanah) dan Air Bawah Tanah juga akan mengalami perbaikan drastis.

Pengolahan tanah sering dikhawatirkan dapat membuat agregat-agregat tanah lebih rentan terhadap benturan butiran air hujan dan air limpasan dengan energi kinetik tinggi, sehingga tanah lebih rawan terhadap proses erosi. Untuk menghindari ini, berbagai cara untuk mengatasi erosi seperti Cara Penutup Tanah, Cara Mekanik, atau Cara Olah Tanah dapat diterapkan. Untuk tanah yang memenuhi syarat, Olah Tanah Konservasi dapat diterapkan, baik Olah Tanah Minimum maupun Tanpa Olah Tanah. Dengan demikian, kerentanan agregat-agregat tanah terhadap proses erosi dapat diturunkan.

Cara lain untuk menurunkan kepadatan tanah adalah dengan menginkorporasikan bahan organik ke dalam tanah (Afandi dkk., 1997a; 1997b; Zhang dkk., 1997; Kumari dkk., 2011) atau penggunaan binatang tanah (makroorganisme). Bahan organik dapat memperbaiki dan memperkokoh agregasi antara partikel-partikel tanah sehingga lebih tahan terhadap proses pemadatan. Zhang dkk. (1997) menunjukkan bahwa penambahan bahan organik dapat menurunkan kerapatan isi tanah (ρ_v) atau menurunkan kepadatan tanah (**Gambar 10.5**).

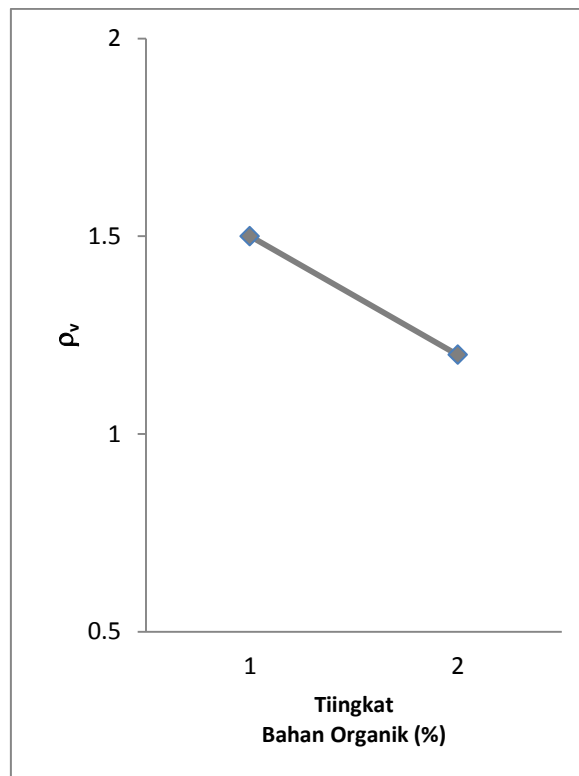
Binatang tanah, termasuk di dalamnya adalah cacing tanah, semut, tikus dan marmut, dapat membuat lubang-lubang dengan berbagai ukuran yang saling berhubungan (Singer dan Munns, 1987). Binatang tanah juga akan meningkatkan kadar bahan organik tanah dengan memasukkan bahan organik dari topsoil ke subsoil atau dari kotorannya yang ditinggalkan di dalam tanah. Cacing tanah bahkan mencerna tanah dan menyatukannya dengan bahan organik serta mengeluarkan kotorannya dalam bentuk kasting. Teknik biopori yang mulai banyak digunakan di kota-kota besar menggunakan dasar pemikiran seperti ini. Dengan demikian, kehadiran binatang tanah dapat meningkatkan porositas total tanah dan kemantapan agregat tanah. Alhasil, dengan cara ini porositas tanah terpelihara dan berbagai proses yang terkait dengan porositas total tanah juga membaik (Edwards dkk., 1993).

c. Degradasi Tanah Organik

Tanah organik (Histosols) memiliki beberapa masalah terkait dengan sifat dasar tanah ini, yaitu kerapatan jenis yang rendah dan kerentanan bahan organik

Abdul Kadir Salam – 2020

terhadap proses dekomposisi. Dua di antara masalah yang terpenting adalah: (1) erosi oleh angin dan (2) dekomposisi oleh mikroorganisme. Karena tanah organik memiliki kerapatan jenis yang relatif rendah, yaitu dalam rentang $0.1 - 0.3 \text{ Mg m}^{-3}$, bila kering tanah ini sangat rentan terhadap proses erosi oleh angin. Kerentanan ini diperparah oleh kenyataan bahwa tanah organik umumnya berada pada topografi datar sehingga angin dapat bergerak tanpa hambatan dengan kecepatan tinggi di atas tanah ini. Akibatnya, tanah organik sangat mudah tererosi. Kerentanan ini dapat diturunkan dengan pengelolaan air yang baik agar kadar air tanah berada dalam kondisi cukup tinggi.



Diadaptasi dari Zhang dkk. (1997)

Gambar 10.5 Penurunan kepadatan tanah dengan penambahan bahan organik.

Karena tersusun sebagian besar (>75%) oleh bahan organik, tanah Histosols sangat rawan terhadap degradasi akibat proses dekomposisi. Tidak seperti faktor erosi angin yang secara teori dapat diatasi, dekomposisi tanah organik oleh mikroorganisme tanah relatif sulit dipecahkan walaupun masalah ini sangat luas cakupannya. Seperti telah diketahui, tanah organik terbentuk karena dekomposisi bahan organik yang terhambat oleh kondisi anaerobik akibat genangan air. Menurunkan permukaan air bawah tanah dan meningkatkan aerasi tanah dapat secara signifikan meningkatkan aktivitas mikroorganisme tanah untuk mengubahnya menjadi energi, CO₂, dan H₂O (**Reaksi 9.2**). Proses ini mengakibatkan menipisnya lapisan tanah Histosols. Keadaan inilah yang dikhawatirkan oleh ahli tanah terhadap proyek pembukaan lahan sejuta hektare di Kalimantan Selatan yang sangat kontroversial beberapa puluh tahun yang lalu.

Salah satu cara untuk menghambat penipisan tanah Histosols adalah dengan menggenangi tanah ini selama tidak digunakan untuk pertanian. Cara ini dimaksudkan untuk memperlambat proses dekomposisi bahan organik oleh mikroorganisme dengan menghambat difusi O₂ ke dalam tanah. Kondisi anaerobik yang diterapkan dapat menghambat aktivitas mikroorganisme karena tidak hadirnya akseptor elektron terpenting, yaitu O₂. Cara ini sebenarnya adalah mengondisikan tanah organik pada keadaan saat tanah tersebut terbentuk.

Cara lainnya adalah dengan pengelolaan enzim tanah. Dalam mendekomposisi bahan organik, mikroorganisme tanah mengeluarkan berbagai jenis enzim tanah, yang secara drastik dapat meningkatkan proses perombakan bahan organik. Bila aktivitas enzim asal mikroorganisme tanah tersebut dapat diturunkan dengan suatu cara tertentu, maka dekomposisi bahan organik tanah Histosols dapat diperlambat. Penurunan ini dapat dilakukan dengan menerapkan senyawa penghambat kerja enzim, misalnya dengan penambahan logam berat, sehingga enzim tanah tidak mampu mempercepat dekomposisi bahan organik tanah, atau dengan menekan populasi dan aktivitas mikroorganisme penghasil enzim. Namun demikian, kemungkinan seperti ini masih dalam tahap pengembangan dan secara teknis belum dapat diterapkan.

d. Pencemaran Antropogenik dan Degradasi Kimia Tanah

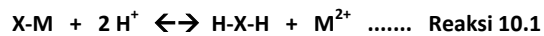
Selain oleh penyebab alami, tanah juga dapat mengalami degradasi akibat pencemaran yang bersifat antropogenik, yang diakibatkan oleh aktivitas manusia.

Abdul Kadir Salam – 2020

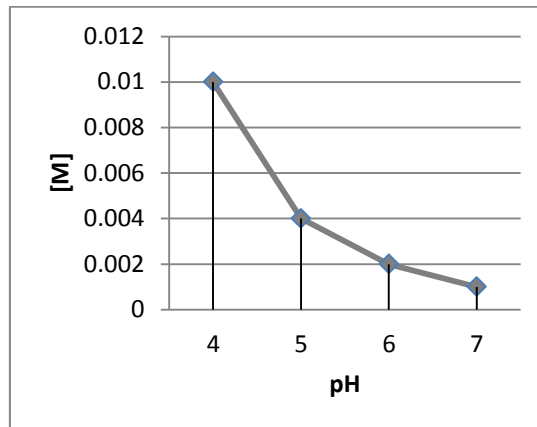
Pencemaran seperti ini diakibatkan baik dalam skala kecil oleh limbah perumahan atau dalam skala besar oleh limbah berbagai industri yang pada saat ini berkembang pesat, termasuk di dalamnya adalah industri pertanian, misalnya karena penggunaan pupuk dan pestisida yang sangat intensif. Kehadiran limbah antropogenik di dalam sistem tanah tentunya dapat menyebabkan pergeseran-pergeseran fisika, kimia, dan biologis. Karena berbagai sifat tanah tersebut umumnya saling berhubungan, perubahan satu sifat tanah akan mengakibatkan perubahan sifat tanah yang lainnya.

Telah banyak dilaporkan bahwa pencemaran antropogenik berpengaruh sangat besar terhadap pergeseran sifat-sifat dan proses kimia tanah. Seperti telah difahami, perilaku kimia tanah dipengaruhi oleh banyak faktor, di antaranya adalah oleh pH dan kandungan unsur tertentu. Kedua sifat tanah ini dapat berubah karena masukan bahan asing. Misalnya, limbah industri tapioka di Provinsi Lampung, yang mengandung bahan organik yang bersifat asam, akan terdekomposisi menghasilkan asam. Oleh karena itu, bila masuk ke dalam sistem tanah, bahan ini dapat menurunkan pH tanah. Karena tanaman memerlukan nilai pH tertentu untuk bertumbuh dan berkembang dengan baik, turunnya pH tanah dapat mengakibatkan terganggunya pertumbuhan dan perkembangan tanaman.

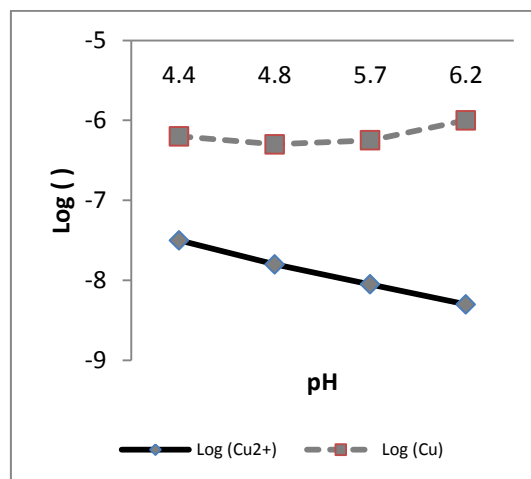
Terganggunya pertumbuhan dan perkembangan tanaman oleh menurunnya pH tanah disebabkan karena berbagai sifat tanah lain juga terpengaruh oleh penurunan pH tanah, yang dapat berakibat buruk. Misalnya, meningkatnya konsentrasi ion H^+ karena turunnya pH tanah dapat meningkatkan kelarutan beberapa unsur logam (M) karena terjadinya reaksi berikut:



dengan X adalah koloid tanah bermuatan negatif, M adalah logam, yang dapat mencakup ion Al^{3+} , yang bersifat racun terhadap tanaman, dan ion unsur logam berat lainnya, yang sebagian dapat bersifat racun bukan saja bagi tanaman tetapi juga bagi hewan dan manusia. Secara umum kelarutan ion logam meningkat dengan menurunnya pH tanah seperti terlihat pada **Gambar 10.6** (Helmke dkk., 1995; Salam dan Helmke, 1998; Salam dkk., 1999f). Namun demikian ada perbedaan antara hubungan konsentrasi logam berat dalam bentuk ion bebas dan dalam bentuk total larut dengan pH tanah. Misalnya, hubungan antara $\log(Cu^{2+})$ atau $\log(Cd^{2+})$ dengan pH bersifat linear, sedangkan hubungan $\log(Cu_T)$ atau $\log(Cd_T)$ dengan pH bersifat kuadratik (Salam dan Helmke, 1998) (**Gambar 10.7**).



Gambar 10.6. Hubungan antara kelarutan ion logam berat dengan pH tanah.

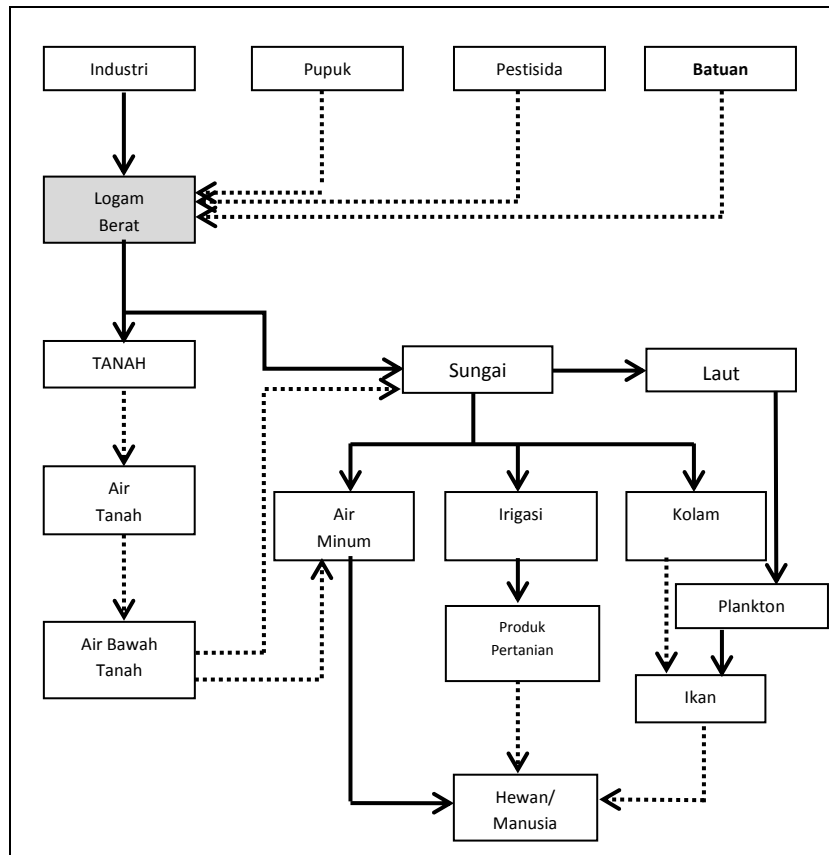


Gambar 10.7 Hubungan logaritmik (Cu^{2+}) dan (Cu_T) dengan pH tanah (Diadaptasi dari Salam dan Helmke, 1998).

Dalam beberapa dekade terakhir logam berat di dalam tanah juga telah menjadi masalah yang semakin serius karena keberadaannya dalam konsentrasi tinggi sangat berbahaya bagi makhluk hidup. Secara umum, logam berat dapat berasal dari dua sumber, yaitu sumber alami berupa batuan-batuan yang kaya mineral dengan kandungan logam berat tinggi, dan sumber antropogenik berupa berbagai jenis limbah industri (Lagerwerff, 1982; Wang dkk., 1982; Leung, 1988; Davies, 1990; Kiekens, 1990; Herreno dan Martin, 1993; Sweet dkk., 1993; Nicholson dkk., 1994; Ville dkk., 1995; Salam dkk., 1996; Yeh dkk., 1996; Hobara dkk., 2009; Smolder dkk., 2012; Robinson dkk., 2017). Logam berat dari kedua jenis sumber ini akan menyebar ke dalam lingkungan dan memasuki jaring makanan melalui tanah, sungai, dan laut.

Logam berat yang mengalir melalui tanah sebagian akan tersaring karena diikat oleh koloid tanah, sebagian lagi akan memasuki air bawah tanah bersama air perkolasi, yang kemudian masuk ke dalam jaring makanan melalui penggunaan air bawah tanah sebagai air minum, dan sebagian lagi akan masuk ke sungai dan laut. Logam berat yang masuk ke sungai akan digunakan sebagai air irigasi atau pengairan tambak dll, yang hasilnya berupa produk pertanian dan perikanan akan memasuki jaringan makanan. Demikian juga, logam berat yang memasuki laut, sebagian akan memasuki tubuh plankton dan ikan, sehingga akhirnya memasuki tubuh manusia melalui jaring makanan. Dengan demikian, emisi logam berat harus diatasi sejak dari hulu agar tidak mencapai hilir yang di dalamnya adalah hewan dan manusia. Pergerakan logam berat dari sumbernya menyebar ke lingkungan diperlihatkan pada **Gambar 10.8**.

Dengan demikian, bila limbah industri yang mengandung logam berat dalam jumlah tinggi masuk ke dalam sistem tanah, maka tanah akan tercemari (Salam dkk., 1998k). Selanjutnya logam berat akan dapat masuk ke dalam tubuh manusia baik secara tidak langsung (melalui **Jalur Tanah → Tanaman → Manusia**) atau secara langsung (melalui **Jalur Tanah → Manusia**). Secara tidak langsung, logam berat dapat memasuki jaring makanan melalui serapan oleh akar tanaman dan kemudian terakumulasi di dalam jaringan hidup manusia (Allaway, 1986). Secara langsung, logam berat dapat masuk ke dalam tubuh manusia melalui: (a) penghirupan udara berdebu, (b) kontak dengan tanah melalui kulit, dan (c) pencernaan melalui mulut, yang sering terjadi pada anak-anak (Wang dkk., 2010). Termasuk ke dalam pergerakan langsung adalah logam berat yang terdapat dalam produk-produk kosmetik, yang digunakan dalam jumlah rendah untuk menekan aktivitas mikroorganisme (Benn dkk., 2010). Akumulasi logam berat telah diketahui sangat berbahaya bagi makhluk hidup. Oleh karena itu, limbah industri perlu diolah terlebih dahulu sebelum dibuang ke dalam lingkungan.



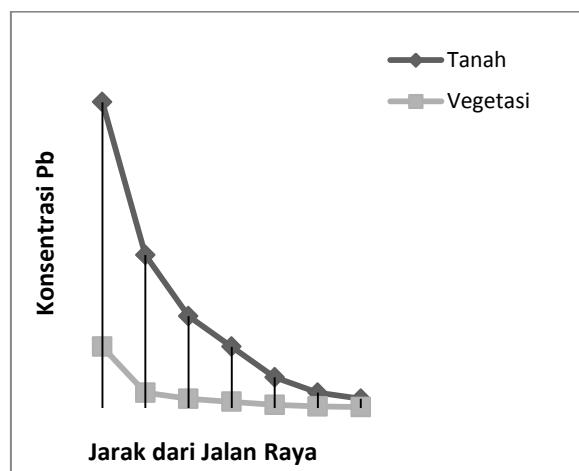
Gambar 10.8. Penyebaran logam berat ke dalam lingkungan.

Sebagai contoh, kandungan Cu dan Pb dalam beberapa jenis limbah industri di Jakarta disajikan pada **Tabel 10.1**. Dalam tabel tersebut terlihat bahwa Cu dan Pb terdapat dalam jumlah tinggi dalam beberapa jenis limbah industri, misalnya Cu dalam limbah industri sendok logam dan pencucian jeans dan Pb dalam limbah industri elektronika. Banyak sekali jenis limbah lainnya yang juga mengandung logam berat dalam jumlah yang signifikan, yang berbahaya bagi makhluk hidup, khususnya bila “dibuang” secara tidak bijak. Namun demikian, bila dapat dikelola dengan baik, logam berat tertentu yang merupakan unsur hara mikro seperti Cu

Abdul Kadir Salam – 2020

dan Zn, dapat memberikan tambahan unsur hara mikro. Limbah industri tertentu dengan kandungan logam berat tidak terlalu tinggi dapat dijadikan sebagai bahan pupuk, yang dapat digunakan untuk meningkatkan kesuburan tanah pertanian (Novpriansyah dkk., 2011).

Emisi logam berat asal industri diduga mengakibatkan pemasukan logam berat dalam jumlah yang sangat tinggi ke Teluk Jakarta. Pada tahun 1983 saja berbagai logam berat diperkirakan masuk ke Teluk Jakarta dengan kecepatan yang sangat masif. Tembaga (Cu) masuk ke Teluk Jakarta melalui berbagai sungai dengan kecepatan 191 kg per hari; Cr 325 kg per hari, Hg 362 kg per hari, Ni 154 kg per hari, Pb 757 kg per hari, dan Zn 43.000 kg per hari (Direktorat Penyelidikan Masalah Air, 1983). Cadmium (Cd), Cu, dan Zn juga masuk ke dalam sistem tanah dengan kecepatan masing-masing 1.322, 7.500, dan 30.000 mg per hektare per tahun (Gimeno-Garcia dkk., 1996). Tanah tercemar oleh Pb banyak terdapat di wilayah yang dilalui jalan raya berlalu lintas padat (Minami dan Araki, 1975; Akhter dan Madany, 1993; Markus dan McBratney, 1996) (**Gambar 10.9**). Persawahan di sekitar pertambangan logam Cr di Vietnam (Co Dinh) sangat terkontaminasi oleh logam berat Cr, Co, dan Ni; yang dapat membahayakan kesehatan manusia melalui produk-produk pertanian dan hewan ternak (Kien dkk., 2010).



Gambar 10.9. Penyebaran Pb di tanah dan vegetasi di dekat jalan raya padat kendaraan (Tiller, 1989).

Tren peningkatan pencemaran oleh logam berat tidak terlepas dari produksi global logam berat untuk berbagai keperluan. Misalnya, produksi global Cu pada tahun 1930 adalah 1.611.000 ton. Peningkatan tajam produksi Cu menjadi 7.660.000 ton pada tahun 1980 atau 50 tahun kemudian telah mengakibatkan emisi global Cu ke dalam tanah sebesar 954.000 ton pada tahun 1980 (Alloway, 1990a).

Tabel 10.1. Kandungan Cu dan Pb beberapa jenis limbah industri di Jakarta.

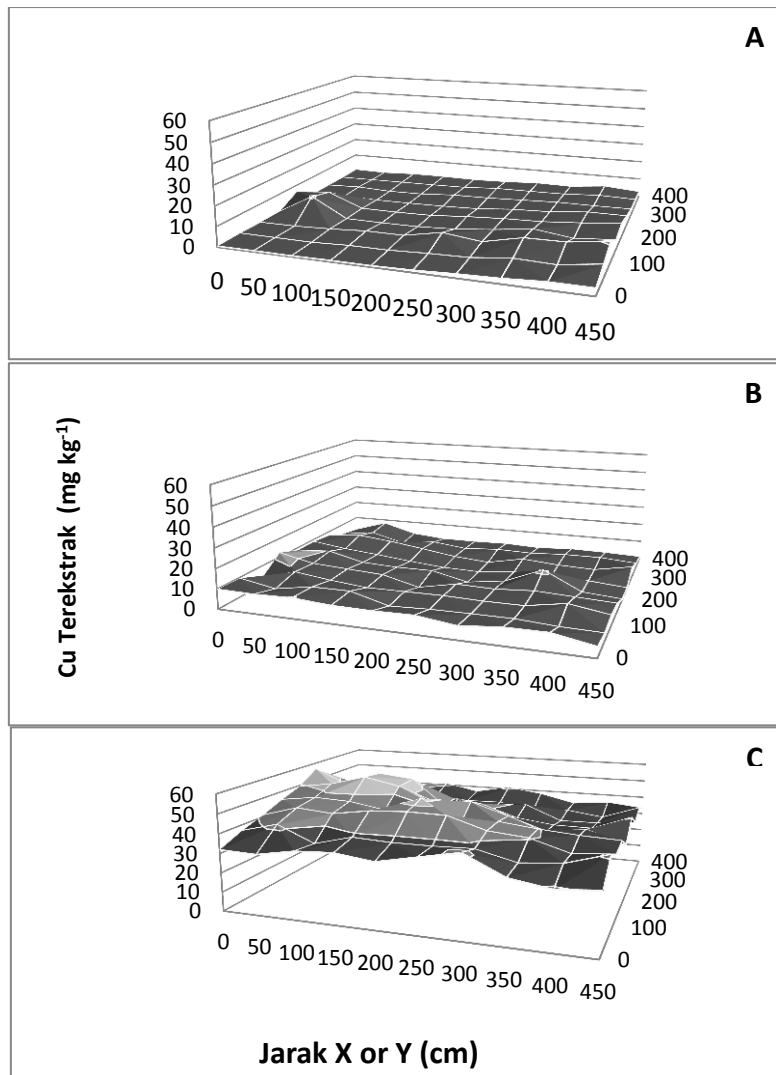
No.	Jenis Limbah	Cu	Pb
	 mg kg ⁻¹	
1	Sendok Logam	23.4	2.44
2	Makanan	1.11	0.36
3	Tekstil A	1.25	0.20
4	Tekstil B	2.58	3.40
5	Pencucian 'Jeans'	25.6	0.44
6	Pencucian	0.93	0.88
7	Percetakan	0.79	0.88
8	Elektronika	4.63	130.84
9	Tekstil C	3.41	2.76
10	Permen	0.77	2.72
11	Tekstil D	0.68	1.92
12	Pipa Logam	4,01	2.72

Selama konsentrasinya di dalam tanah masih di bawah ambang batas bahaya, emisi logam berat ke dalam sistem tanah tidak menimbulkan bahaya bagi makhluk hidup. Misalnya, total konsentrasi Cu di dalam tanah tidak boleh melebihi 60 mg kg⁻¹, total konsentrasi Zn tidak melebihi 70 mg kg⁻¹; serta Cd dan Pb masing-masing

harus < 9 dan $< 100 \text{ mg kg}^{-1}$ (Ross, 1994). Angka ini merupakan batas toksik logam berat tersebut di dalam tanah. Namun demikian, konsentrasi logam berat di dalam tanah sangat dipengaruhi oleh masukan dari luar sistem tanah, baik dari sumber alami maupun sumber antropogenik (Juracek dan Ziegler, 2006 ; Biasioli dkk., 2007; Benke dkk., 2008; Berenguer dkk., 2008; Lin dkk., 2008; Cakmak dkk., 2010). Berenguer dkk. (2008) melaporkan bahwa penggunaan jangka panjang limbah cair industri anggur secara signifikan meningkatkan konsentrasi Cu dan Zn di dalam tanah. Aplikasi jangka panjang kotoran sapi juga secara signifikan meningkatkan konsentrasi total dan ketersediaan Cu dan Zn di dalam tanah (Benke dkk., 2008). Konsentrasi Cu, Ni, Hg, Pb, Cd, dan As dalam contoh sedimen dari unit pengelolaan limbah elektronik di Guiyu, Guangdong, China, meningkat secara signifikan di atas konsentrasi alami (Guo dkk., 2009). Dengan demikian, masukan dari luar sistem tanah dapat meningkatkan konsentrasi logam berat di atas batas ambang sehingga logam berat berbahaya bagi makhluk hidup.

Namun demikian, tingkat bahaya logam berat lebih rendah bila terakumulasi di dalam tanah dibandingkan di dalam badan air atau udara, yang dapat berdampak langsung terhadap makhluk hidup. Tanah memiliki kemampuan untuk mengikat logam berat dan mengimobilisasinya dalam jangka waktu yang lama tanpa diserap oleh tanaman. Pakpahan (2020) melaporkan bahwa logam berat Cu dan Zn asal limbah industri yang diperlakukan 21 tahun yang lalu sebagian besar masih terdapat di dalam tanah. Terjadi perubahan konsentrasi Cu dan Zn setelah 21 tahun, namun diduga sebagian besar hanya karena pergeseran horisontal akibat olah tanah (**Gambar 10.10**).

Bahaya logam berat terhadap kesehatan manusia telah banyak didokumentasikan dalam kepustakaan (Alloway, 1990d; Steinnes, 1990; Baker, 1990). Djuangsih (1992) menyarikan beberapa organ dan sistem dalam tubuh manusia yang relatif rawan terhadap pengaruh negatif logam berat. Alloway (1990d) menggambarkan gangguan kesehatan manusia akibat akumulasi Cd dalam jaringan tubuh manusia, yang disebabkan oleh tercemarnya air sungai dan sawah di Lembah Jintsu Toyama Jepang pada tahun 1940-an. Penumpukan Cd mengakibatkan terjadinya penyakit *Itai-itai* yang sangat fatal. Pada tahun 1950-an juga terjadi kasus di Teluk Minamata Jepang, berkaitan dengan akumulasi Hg. Masyarakat Minamata teracuni oleh Hg sebagai akibat terakumulasinya metil merkuri di dalam ikan yang mereka konsumsi (Steinnes, 1990). Baker (1990) juga menunjukkan bahwa keracunan Cu dapat mengakibatkan penyakit hereditas yang dikenal dengan nama penyakit Wilson. Di Indonesia baru-baru ini juga mencuat sebuah tragedi yang sama di Teluk Buyat, Kabupaten Minahasa, Sulawesi Utara.



Gambar 10.10. Penyebaran logam berat Cu pada petak (4 m x 4.5 m) 21 tahun setelah perlakuan limbah industry berlogam berat dengan dosis A = 0, B = 15, dan C = 60 Mg ha^{-1} .

Toksistas logam berat beraneka ragam (Lagerwerff, 1972; Bohn dkk., 1985; Tiller, 1989; Alloway, 1990d; Steinnes, 1990; Widowati dkk., 2008). Di antara logam yang sangat toksik adalah Hg, Cd, Pb, Cu, dan Zn; yang toksistasnya sedang adalah Cr, Ni, dan Co; dan yang toksistasnya rendah adalah Mn dan Fe. Toksistas logam berat juga tergantung pada jenis makhluk hidup yang terpapar. Sebagian makhluk hidup lebih rentan daripada makhluk hidup lainnya. Toksistas logam berat terhadap beberapa jenis makhluk hidup disajikan pada **Tabel 10.2**. Logam yang di sebelah kiri lebih toksik daripada logam-logam di sebelah kanannya, sehingga logam-logam di sebelah kirinya bersifat toksik pada konsentrasi yang lebih rendah dibandingkan dengan logam-logam di sebelah kanannya.

Tabel 10.2. Toksistas logam berat.

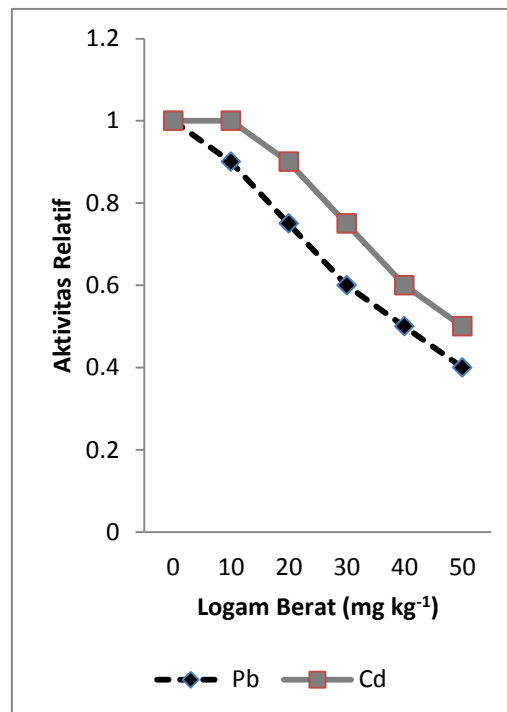
No.	Organisme	Urutan Toksistas
1	Alga	Hg > Cu > Cd > Fe > Cr > Zn > Co > Mn
2	Tanaman berbunga	Hg > Pb > Cu > Cd > Cr > Ni > Zn
3	Jamur	Ag > Hg > Cu > Cd > Cr > Ni > Pb > Co > Zn >Fe
4	Fitoplankton	Hg > Cu > Cd > Zn > Pb

*Diambil dari Sposito (1989)

Di dalam tanah logam berat juga mengakibatkan pergeseran kimia dan biologis. Telah dilaporkan bahwa logam berat berpengaruh negatif terhadap aktivitas beberapa jenis enzim tanah (Mathur dan Sanderson, 1980; Mathur dkk., 1980; Stroo dan Jencks, 1982; Dick dan Tabatabai, 1983; Stott dkk., 1985; Sakai dan Tadano, 1993; Joshi dkk., 1993; Salam dkk., 1997a; 1997e; 1997f; 1997n; Fernandes-Calvino dkk., 2012). Para peneliti secara umum melaporkan bahwa unsur logam berat menekan aktivitas berbagai enzim, di antaranya fosfatase asam, β-glucosidase, dan urease (Juma dan Tabatabai, 1977; Scott dkk., 1985; Eivazi dan Tabatabai, 1990; Park dkk., 1992; Stott dkk., 1992; Salam dkk., 1997f; 1997n; 1999h). Telah dilaporkan bahwa populasi dan aktivitas mikroorganisme dalam tanah Histosols dengan konsentrasi Cu tinggi lebih rendah daripada dengan konsentrasi Cu rendah (Mathur dkk., 1980). Salam dkk. (1997n) melaporkan bahwa

Pb menekan aktivitas fosfatase asam sampai dengan 46.5% pada tingkat penambahan Pb 40 mg kg⁻¹ dan Cd menekan aktivitas enzim tersebut sebesar 43.5% pada tingkat penambahan Pb 40 mg kg⁻¹. Penurunan aktivitas fosfatase asam akibat meningkatnya konsentrasi Pb atau Cd disajikan pada **Gambar 10.11**.

Seperti pH, kadar air, dan temperatur tanah, logam berat juga dapat memengaruhi aktivitas enzim tanah sedikitnya melalui dua mekanisme. Pertama adalah melalui pengaruh langsung logam berat terhadap aktivitas enzim di dalam tanah, yang mengakibatkan inaktivasi enzim sehingga menghambat proses perombakan bahan organik. Telah dilaporkan bahwa senyawa organik di dalam tanah diduga dapat mengompleks logam berat (Tate III, 1987). Asosiasi logam berat dengan senyawa enzim mengakibatkan kemampuan enzim dalam proses perombakan bahan organik menurun.



Gambar 10.11. Penurunan aktivitas fosfatase asam oleh Pb atau Cd (Diadaptasi dari Salam dkk., 1997n).

Mekanisme kedua berkaitan dengan interaksi logam berat dengan mikroorganisme tanah, termasuk di antaranya mikroorganisme tanah penghasil enzim (Baath, 1989; Landmeyer dkk., 1993; Fließbach dkk., 1994; Huysman, 1994; Hiroki, 1994; Witter dkk., 1994; Zhou dkk., 2011). Landmeyer dkk. (1993) melaporkan bahwa biomassa mikroorganisme menurun drastik pada tanah yang diperlakukan dengan Pb. Zhou dkk. (2011) juga melaporkan bahwa peningkatan Cu akibat penggunaan fungisida ber-Cu menurunkan biomassa mikroorganisme tanah dan mengubah komposisi keberagamannya di dalam tanah perkebunan jeruk.

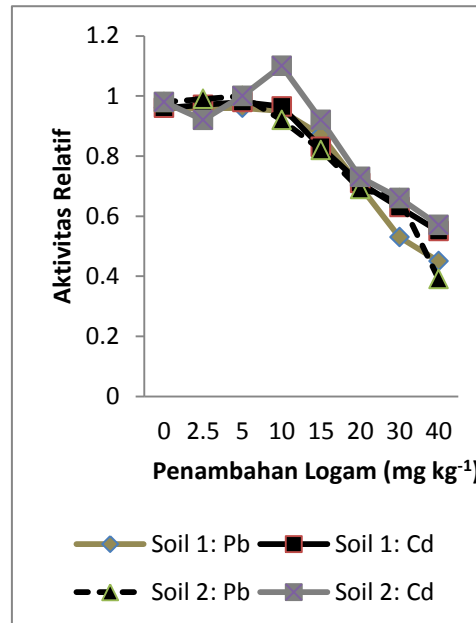
Peningkatan konsentrasi logam berat juga berpengaruh negatif terhadap pertumbuhan dan perkembangan tanaman. Salam dkk. (1999c) melaporkan bahwa pertumbuhan tanaman bayam sangat tertekan di tanah yang diperlakukan dengan Cu dan Zn pada konsentrasi 40 mg kg^{-1} . Perlakuan limbah industri berlogam berat (Cu dan Zn) juga dilaporkan menurunkan bobot kering gulma (Sriyani, 1999).

Namun demikian, sebenarnya sebagian logam berat adalah unsur hara mikro, yang keberadaannya di dalam tanah sangat diperlukan. Sayangnya, sebagian besar logam berat tidak diperlukan oleh tanaman dan hewan. Secara teori, seluruh logam berat sangat berbahaya dan bersifat toksik bila di dalam tanah terdapat dalam konsentrasi sangat tinggi. Oleh karena itu, seperti halnya dalam memanfaatkan limbah industri, dalam memproduksi dan menggunakan pupuk kimia juga kita harus mempertimbangkan kandungan logam berat di dalam pupuk. Sebagian pupuk dan pembenah tanah seperti Dolomit, TSP, SP-36, Batuan Fosfat Alam, dan bahkan Urea, telah dilaporkan mengandung logam berat. Logam-logam ini bila terkonsentrasi di dalam sistem tanah akan mencemari makhluk hidup yang tergantung padanya. Seperti telah diungkapkan, pengaruh buruknya akan lebih nyata bila pH tanah relatif rendah (**Gambar 10.6** dan **Gambar 10.7**).

Seperti telah diungkapkan, mikroorganisme tanah merupakan salah satu makhluk hidup yang secara nyata dipengaruhi oleh kehadiran logam berat dalam konsentrasi tinggi akibat polusi oleh limbah industri. Telah dilaporkan, bahwa Pb dan Cd secara signifikan menurunkan aktivitas Fosfatase Asam dan Fosfatase Alkalin, sedangkan Cu dan Fe tidak memberikan pengaruh (Salam dkk., 1997f) (**Gambar 10.12**). Penurunan ini merupakan akibat tidak langsung dari kehadiran Pb dan Cd terhadap keberadaan enzim tanah sebagai akibat menurunnya populasi dan aktivitas mikroorganisme dalam kehadiran logam berat tersebut. Fenomena ini menjelaskan buruknya pengaruh logam berat asal limbah industri terhadap makhluk hidup.

Untuk mengatasi polusi lingkungan tanah oleh logam berat, telah dilakukan berbagai usaha, dan tersedia beberapa cara yang dapat dilakukan (Rabinowitz, 1993; Ma dkk., 1993; 1994; 1995; Ruby dkk., 1994; Suryanto dan Susetyo, 1997;

Salam dkk., 1997k; 1997g; 1998j; Salam dkk., 2000; Salam, 2000; 2001; Salam dan Ginanjar, 2018). Cara terbaik adalah dengan melakukan pengolahan limbah industri sebelum limbah dibuang ke dalam lingkungan, sehingga logam berat yang memasuki lingkungan tanah dapat dipertahankan minimum. Namun demikian, permasalahannya menjadi sangat lain bila tanah ternyata telah tercemari oleh logam berat.



Diadaptasi dari Salam dkk. (1997f)

Gambar 10.12. Pengaruh Pb dan Cd terhadap aktivitas fosfatase tanah.

Salah satu yang dapat dilakukan bila tanah telah tercemar oleh logam berat adalah dengan menggunakan kapur dan bahan organik/biosolid/arang alami (Salam, 1993; 1995a; 1995b; Salam dan Maswah, 1994; Salam dkk., 1997i; 1997j; Salam dkk., 1998a; 1998h; Tokunaga dkk., 2001; 2003; Brown dkk., 2004; Stehouwer dkk., 2006; Schroder dkk., 2008; Brown dkk., 2009; Kukier dkk., 2010; Buss et al., 2012). Penambahan kapur dapat meningkatkan pH tanah, sehingga

Abdul Kadir Salam – 2020

dapat pula meningkatkan KTK tanah dan penjerapan kation logam berat (Helling dkk., 1964; Udo dkk., 1970; Singh dan Sekhon, 1977; Trehan dan Sekhon, 1977; Tyler dan McBride, 1982; Sumner dkk., 1991; Salam dkk., 1995b; Tack dkk., 1995; Salam, 1997c; Salam dkk., 1998g; Choi dkk., 1999; Mawardy, 2001), kecuali Cu dan Zn pada tanah Andisols, yang koloidnya sangat rentan terhadap perubahan pH, sehingga penambahan kapur justru menghancurkan koloid tanah (mineral Alofan) Andisol yang bersifat metastabil (Paterson dkk., 1991; Salam dkk., 1997j; 1997h). Welch dan Lund (1989) juga memperlihatkan bahwa jarak vertikal translokasi Zn di dalam tanah berbanding terbalik dengan pH tanah. Kemungkinan lain, meningkatnya pH juga dapat meningkatkan pengendapan logam berat, karena proses pengendapan logam berat umumnya meningkat dengan peningkatan pH (Lindsay, 1979; Brummer dkk., 1983; Ma dan Lindsay, 1990; Workman dan Lindsay, 1990; El-Falaky dkk., 1991; Stahl dan James, 1991; Salam dkk., 1999c). Namun, Udo dkk. (1970) melaporkan bahwa pengendapan Zn dalam bentuk hidroksida tidak terjadi pada konsentrasi Zn^{2+} alami. Bila konsentrasi Zn^{2+} meningkat di atas kapasitas adsorpsi maksimum, nilai hasil kali konsentrasi $(Zn^{2+})(OH^-)^2$ berkorelasi dengan hasil kali kelarutan $Zn(OH)_2$, yang menunjukkan terjadinya proses pengendapan Zn. Hubungan antara kelarutan beberapa jenis logam berat dengan pH tanah diperlihatkan oleh persamaan pada **Tabel 10.3**, yang menunjukkan bahwa kelarutan logam berat di dalam air tanah menurun dengan meningkatnya pH tanah.

Tabel 10.3. Hubungan antara kelarutan Cd, Cu, dan Zn dengan pH tanah.

No	Logam	Persamaan
1	Cd	$\text{Log } (Cd^{2+}) = 6.50 - 2 \text{ pH}$
2	Cu	$\text{Log } (Cu^{2+}) = 2.80 - 2 \text{ pH}$
3	Zn	$\text{Log } (Zn^{2+}) = 5.80 - 2 \text{ pH}$

Diambil dari Lindsay (1979), Workman dan Lindsay (1990), Ma dan Lindsay (1990), El-Falaky dkk. (1991)

Bahan organik merupakan sumber muatan negatif, yang muncul dari berbagai gugus fungsional (**Tabel 10.4**) seperti fenolik dan karboksilat sehingga bila ditambahkan ke dalam tanah bahan organik dengan sendirinya dapat

meningkatkan KTK tanah dan dapat menurunkan kelarutan logam berat (Helling dkk., 1964; Tan dan Dowling, 1984; McGrath dkk., 1988; Alloway 1990b; Parfitt dkk., 1995; Rodella dkk., 1995). Saidy dan Badruzsaufari (2009) juga melaporkan penurunan konsentrasi Cr(VI) dengan meningkatnya kandungan C organik. Gugus fungsional bahan organik di dalam tanah akan mengalami dehidrogenasi dan memunculkan muatan negatif yang dapat mengompleks atau menjerap ion bebas logam berat, khususnya pada pH alkalin. KTK dari Horizon A dan B beberapa tanah di Selandia Baru dilaporkan berasal dari gugus karboksilat bahan organik (Rodella dkk., 1995). Jumlah maksimum logam berat yang dapat diikat oleh bahan organik tanah adalah kira-kira sama dengan jumlah gugus karboksil di dalam bahan organik tanah (Alloway, 1990b).

Tabel 10.4. Beberapa gugus fungsional dalam bahan organik¹⁾.

No.	Gugus Fungsional	Formula Kimia
1	Karboksil	R-COOH
2	Karbonil	R-COH
3	Amino	R-NH ₂
4	Imidazol	Cincin Aromatik NH
5	Fenolik OH	Cincin Aromatik OH
6	Alkoholik OH	R-OH
7	Sulfhidril	R-SH

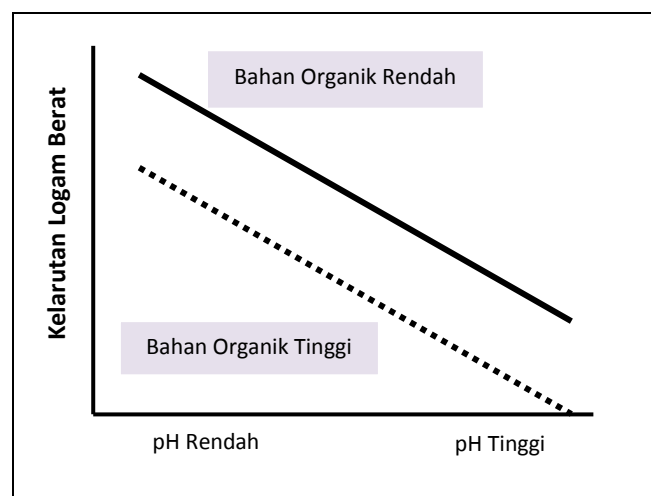
¹⁾Diambil dari Sposito (1989)

Rodella dkk. (1995) melaporkan bahwa bahan organik hanya menyumbang 32% dari nilai KTK tanah. Namun demikian, dengan memasukkan faktor pH, sumbangan bahan organik terhadap KTK tanah meningkat menjadi 78%. Fakta ini menunjukkan bahwa pH tanah juga merupakan faktor yang penting dalam mengimobilisasi logam berat. Perlunya pH tanah tidak hanya penting bagi penjerapan nir-spesifik tetapi juga bagi penjerapan spesifik, yang melibatkan pembentukan ikatan kovalen dengan ion pada kisi mineral. Mekanisme penjerapan spesifik lebih penting karena kapasitas jerap tanah yang berkaitan dengan mekanisme ini lebih tinggi dibandingkan dengan yang berasal dari pejerapan nir-

Abdul Kadir Salam – 2020

spesifik. Proses penurunan kelarutan logam berat dengan penambahan kapur (yang meningkatkan pH tanah) dan bahan organik dapat digambarkan secara skematik pada **Gambar 10.13**.

Dari **Gambar 10.13** dapat diduga bahwa logam berat asal limbah industri yang dapat diserap oleh akar tanaman dapat diturunkan karena sebagian logam berat asal limbah industri dijerap oleh koloid liat dan bahan organik, yang daya jerapnya meningkat dengan penambahan bahan kapur dan/atau bahan organik. Fenomena ini terlihat dengan jelas pada **Gambar 10.14**, yang menunjukkan bahwa kapur dan kompos daun singkong dapat menurunkan kelarutan Cu asal limbah industri sendok logam (Salam dkk., 1998a).



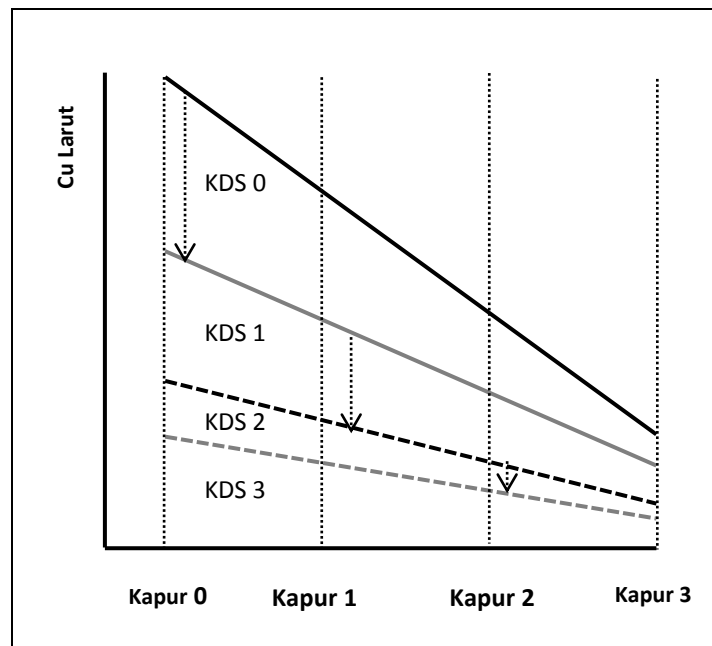
Diadaptasi dari Salam dkk. (1998a; 1998f)

Gambar 10.13. Penurunan kelarutan logam berat akibat kapur dan bahan organik.

Penurunan ketersediaan logam berat asal limbah industri dengan penambahan kapur dan/atau kompos daun singkong juga tampak dari indikator pertumbuhan berupa tinggi tanaman (**Gambar 10.15**) (Salam dkk., 1999b; 1999g). Perlakuan 15 ton limbah industri sendok logam ha^{-1} secara signifikan menekan pertumbuhan tanaman jagung yang ditanam di lahan pertanian di Sri Bawono, Lampung Tengah.

Abdul Kadir Salam – 2020

Penambahan kapur dan/atau bahan organik terlihat secara jelas meningkatkan pertumbuhan tanaman. Perbaikan pertumbuhan tanaman yang terpolusi logam berat akan jauh lebih baik bila kedua bahan tersebut ditambahkan ke dalam tanah (Salam dkk., 1999g). Penumpukan Cu dan Pb dalam jaringan tanaman bayam dan beberapa jenis gulma di tanah terpolusi logam berat juga menurun dengan penambahan kapur dan/atau kompos daun singkong (Sriyani dan Salam, 1998; Salam dkk., 1998g; 1999b). Sing dkk. (1995) juga melaporkan bahwa meningkatnya pH tanah menurunkan penyerapan Ni dan Zn oleh tanaman.

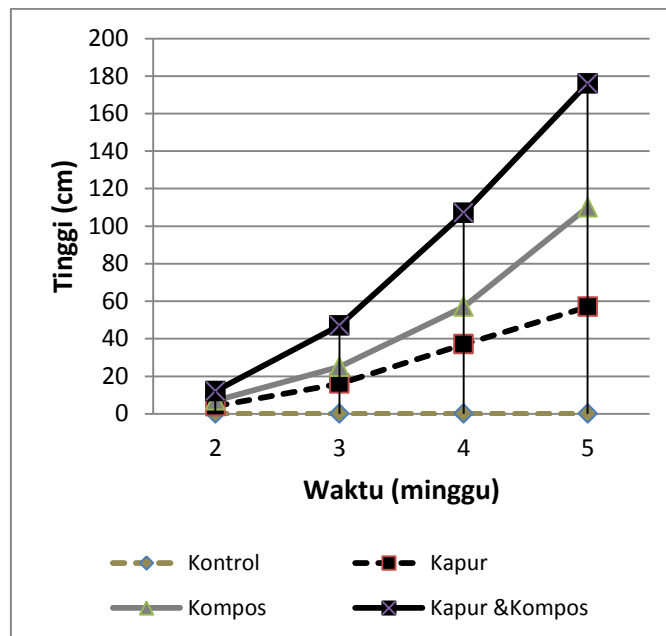


*Diadaptasi dari Salam dkk. (1998a)

Gambar 10.14. Penurunan kelarutan Cu asal limbah industri sendok logam di dalam tanah akibat penambahan kapur dan kompos daun singkong.

Penambahan kapur dan/atau bahan organik juga dapat menekan pergerakan logam berat di dalam tubuh tanah karena pengaruhnya terhadap pH dan KTK tanah. Logam berat asal limbah lumpur telah ditunjukkan bergerak dari lapisan

olah ke subsoil, khususnya setelah rentang waktu yang lama (Dowdy dkk., 1991; Salam dkk., 2005). Mobilitas logam berat di atas sangat tergantung pada beberapa sifat tanah, di antaranya KTK, Ca-dd, dan Kejenuhan Basa; semakin tinggi ketiga parameter ini akan mengakibatkan logam berat semakin imobil (Sanchez-Martin dan Sanchez-Camaza, 1993). Ketiga sifat tanah ini sangat terkait dengan meningkatnya pH tanah akibat pengapuran dan/atau penambahan bahan organik. Selaras dengan fakta ini, pergerakan Cu asal limbah industri di dalam tubuh tanah sebuah Ultisol dilaporkan terhambat oleh perlakuan kapur dan/atau kompos daun singkong, namun secara umum sebagian besar Cu dan Zn tertahan di topsoil (Salam, dkk., 1998b; 2005). Peningkatan pH akibat pengapuran diduga meningkatkan KTK tanah, sehingga secara tidak langsung dapat meningkatkan penyerapan kation logam berat dan menekan gerakan logam berat di dalam tubuh tanah (Helling dkk.,1964; Tyler dan McBride, 1982).



Diadaptasi dari Salam dkk. (1999g)

Gambar 10.15. Perbaikan pertumbuhan jagung di tanah terpolusi oleh logam berat.

Beberapa peneliti lain juga melaporkan bahwa kapur dan/atau kompos juga berpengaruh terhadap penghambatan translokasi Cu dan Zn dari topsoil menuju subsoil (Fahad, 1987; Welch dan Lund, 1989; Berthelson dkk., 1994; Salam dkk., 1998b; 1998e). Tembaga dan Zn bergerak secara signifikan dari topsoil ke subsoil hanya bila limbah industri yang masuk ke dalam tanah relatif tinggi karena ada sebagiannya yang tidak terikat kuat pada koloid negatif tanah. Ini terkait dengan meningkatnya daya jerap tanah terhadap logam berat akibat meningkatnya pH tanah. Dilaporkan pula bahwa pergerakan Cu ke subsoil lebih terhambat jika dibandingkan dengan pergerakan Zn, diakibatkan oleh preferensi koloid tanah yang lebih tinggi terhadap Cu (Fahad, 1987; Salam dkk., 1998b). Dari sebuah penelitian diungkap bahwa preferensi tanah terhadap logam berat menurun dengan urutan: Cu > Cd > Zn; temuan ini menjelaskan lebih kuatnya ikatan koloid tanah dengan Cu dibandingkan dengan Zn (Salam dkk., 1997). Lin dkk. (2008) juga melaporkan bahwa Cu cenderung untuk diikat lebih kuat oleh oksida Fe dan bahan organik.

Perubahan-perubahan kimia di atas, yang disebabkan oleh limbah antropogenik, sudah barang tentu akan berpengaruh terhadap biologi tanah, karena biologi tanah sangat terkait dengan sifat-sifat kimia tanah. Perubahan pH tanah akibat limbah industri, misalnya, akan sangat berpengaruh terhadap populasi dan aktivitas mikroorganisme tanah. Seperti telah diungkapkan sebelumnya bahwa jamur sangat adaptif dengan pH rendah, sehingga akan tertekan bila pH tanah meningkat. Sebaliknya, populasi dan aktivitas bakteri akan meningkat dengan peningkatan pH sampai pH netral. Perubahan-perubahan lain, seperti meningkatnya kelarutan logam berat tanah, meningkatnya bahan organik tanah akibat masukan limbah industri, dan lain-lain, akan secara langsung atau tidak langsung berpengaruh terhadap biologi tanah (Reddy dan Faza, 1989).

Dari hasil penelitiannya selama 16 tahun, Bendfeldt dkk. (2001) menyimpulkan bahwa inkorporasi bahan organik sangat bagus untuk memperbaiki sifat-sifat tanah bekas tambang. Namun demikian, degradasi bahan organik asal lumpur limbah atau bahan perlakuan melalui oksidasi oleh mikroorganisme dikhawatirkan dapat mengakibatkan pembebasan logam berat di masa yang akan datang. Stietiya dan Wang (2010) melaporkan bahwa oksidasi dengan menggunakan H₂O₂ encer ternyata secara nyata menurunkan Cu dan sedikit menurunkan Zn yang terikat oleh senyawa organik. Namun, oksidasi juga meningkatkan Cu-dd dan Zn-dd. Secara umum, oksidasi bahan organik dapat meningkatkan mobilitas dan ketersediaan Cu dan Zn, namun tidak berpengaruh terhadap Pb dan As.

Selain dengan penambahan kapur dan/atau bahan organik, proses penurunan kelarutan logam berat juga dapat dilakukan dengan menggunakan berbagai bahan dan proses lain. Penggunaan zeolit (misalnya Analsin NaAl₂O₆·H₂O) dapat

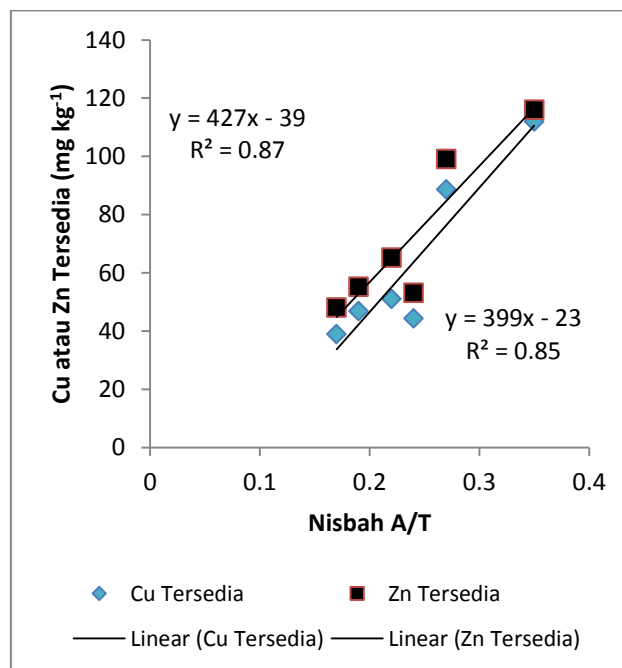
meningkatkan penjerapan kation-kation pencemar termasuk kation logam berat oleh tanah, sehingga sebagian logam berat dapat diimobilisasi (Salam dkk., 1998d; Setyawan, 2002; 2003; Penn dkk., 2010). Peningkatan proses imobilisasi juga dapat dilakukan dengan penggunaan batuan atau pupuk fosfat, baik melalui proses penjerapan oleh senyawa-senyawa fosfat maupun proses pengendapan menjadi senyawa fosfat (Rabinowitz, 1993; Ruby dkk., 1994; Ma dkk., 1993; 1994; 1995; Brown dkk., 2004; Moseley dkk., 2008; Kilgour dkk., 2008).

Cara lain yang dapat dilakukan, selain memodifikasi kelarutan logam berat dengan cara kimia melalui peningkatan proses penjerapan dan pengendapan dengan berbagai modifikasinya, adalah dengan mengeluarkan logam berat dari dalam sistem tanah yang tercemar oleh logam berat. Logam berat yang berada di dalam tanah dikumpulkan dan kemudian dibuang dengan cara yang secara ilmiah dianggap lebih aman atau dimanfaatkan untuk keperluan tertentu setelah dimurnikan. Salah satu cara untuk mengeluarkan logam berat adalah dengan menggunakan tanaman bioakumulator, yang dapat tumbuh dan menyerap logam berat dengan baik pada tanah yang tercemar oleh logam berat.

Telah diperlihatkan bahwa beberapa jenis tanaman menyerap logam berat dengan sangat baik, sehingga dapat digunakan sebagai tanaman bioakumulator dalam penanganan logam berat dalam lingkungan dengan teknik **Fitoremediasi** (Siregar dan Siregar, 2010; Laidlaw dkk., 2012; Kambhampati dan Vu, 2013; Hua dan Li, 2014; Rosenfeldt dkk., 2014). Misalnya, bayam, bunga matahari, dan sawi dapat digunakan dalam teknik **Fitoekstraksi** untuk mengekstrak kontaminan logam berat dari dalam tanah, sedimen, atau lumpur yang terkontaminasi oleh logam berat. Salam dkk. (1999b) melaporkan bahwa serapan Cu oleh tanaman bayam lebih tinggi daripada dalam tanaman jagung. Sebuah tanaman metalofit dari Belgia *Thlaspi caerulescens* adalah hiperakumulator, yang dapat tumbuh dengan baik dalam media dengan konsentrasi sampai 25,000 mg Zn kg⁻¹ dan 1,000 mg Cd kg⁻¹. Tanaman ini sangat toleran logam berat dan menyerap Zn dan Cd dalam jumlah ekstrim tanpa penurunan hasil dan dapat digunakan dalam fitoekstraksi tanah yang terkontaminasi oleh Zn dan Cd (Brown dkk., 1995). Beberapa padi varietas *Indica* berpotensi sebagai fitoekstraktor Cd pencemar di persawahan karena varietas padi ini dapat mengakumulasi Cd dalam jarungannya dan memiliki biomassa yang besar. Dalam penelitiannya, Ibaraki dkk. (2009) menunjukkan bahwa setelah penanaman dengan varietas ini selama dua tahun, konsentrasi Cd di dalam tanah sawah yang tercemar turun 18% sehingga aman untuk penanaman padi non-fitoekstraktor.

Hidayatullah (2020) melaporkan bahwa biomassa rumput gajah didistribusikan lebih banyak ke akar tanaman daripada ke tajuk tanaman pada tanah tercemar seperti diperlihatkan pada nisbah akar per tajuk yang semakin tinggi dengan lebih

tingginya logam berat pencemar di dalam tanah (**Gambar 10.16**). Serapan logam berat Cu dan Zn juga berbanding lurus dengan konsentrasi logam berat di dalam tanah dengan korelasi yang sangat tinggi (**Tabel 10.5**). Serapan Cu dan Zn oleh rumput gajah juga berbanding lurus dengan r^2 sangat tinggi dengan konsentrasi Cu dan Zn di dalam tanah, serapan oleh rumput gajah meningkat dengan meningkatnya konsentrasi Cu dan Zn di dalam tanah. Nilai r^2 yang lebih tinggi dengan akumulasi Cu dan Zn di dalam akar tanaman menunjukkan bahwa logam berat yang diserap rumput gajah diakumulasikan lebih banyak di akar tanaman bukan di tajuk tanaman (**Tabel 10.5**).



Gambar 10.16. Hubungan antara ketersediaan Cu atau Zn dengan Nisbah A/T (Diadaptasi dari Hidayatullah, 2020).

Table 10.5. Koefisien korelasi antara serapan Cu dan Zn oleh rumput gajah dengan Cu dan Zn Tersedia di dalam tanah*.

Unsur	Akumulasi dalam Tanaman		
	Akar	Tajuk	Seluruh Tanaman
Cu	0.98	0.76	1.00
Zn	0.90	0.25	1.00

*Diadaptasi dari Hidayatullah (2020)

Kandungan unsur hara di dalam limbah industri juga merupakan potensi yang dapat dimanfaatkan untuk pertanian (Salam dkk., 1999i; Salam dkk., 2000; Novpriansyah dkk., 2001). Namun demikian, walaupun beberapa jenis limbah industri dilaporkan mengandung berbagai jenis unsur hara esensial bagi tanaman, baik unsur hara makro maupun unsur hara mikro (McCalla dkk., 1986; Pratt dkk., 1986), penggunaannya dalam bidang pertanian masih merupakan dilema. Salah satu hal yang dikhawatirkan adalah tingginya kandungan logam berat di dalam limbah industri tertentu (DPMA, 1983; Kardos dkk., 1986; Kabata-Pendias dan Pendias, 1992; Salam dkk., 1996; Alloway, 1999a; Salam, 1997a).

Walaupun sebenarnya beberapa jenis logam berat diperlukan oleh tanaman sebagai unsur hara mikro, misalnya Cu, Fe, Zn, dan Cu (Tisdale dkk., 1985), logam berat lain yang tidak merupakan unsur hara esensial (seperti Cd, Cr, dan Hg) dapat menimbulkan dampak buruk terhadap makhluk hidup bila masuk ke dalam jaring makanan (Lagerwerff, 1982; Alloway, 1990d; Baker 1990; Steinnes, 1990). McLaughlin (1996) melaporkan bahwa Cd secara perlahan telah menumpuk di tanah pertanian, dan konsentrasi Cd di dalam berbagai produk pertanian dalam beberapa kasus telah melampaui tingkat yang diperbolehkan untuk konsumsi. Setiap jenis logam berat (termasuk yang tergolong unsur hara mikro) juga dapat berpengaruh buruk bila konsentrasinya tinggi. Perubahan faktor lain seperti penurunan pH juga dapat meningkatkan kelarutan dan ketersediaannya terhadap tanaman. Oleh karena itu, pemanfaatan limbah industri berlogam berat untuk

pertanian harus dibarengi dengan usaha untuk menurunkan kelarutannya di dalam tanah.

Sebuah usaha penggunaan limbah industri untuk penyediaan unsur hara tanaman telah dilaporkan oleh Novpriansyah dkk. (2001). Penerapan pupuk dengan bahan baku limbah industri sendok logam, kapur, dan gambut memperbaiki beberapa sifat kimia tanah, di antaranya: (a) meningkatkan pH tanah dan (b) meningkatkan K-dd, Cu-Tersedia dan Zn-Tersedia. Perlakuan dengan pupuk ini ternyata juga menurunkan P-tersedia, Mn-Tersedia, dan Fe-Tersedia.

Selain logam berat, kontaminan berbahaya yang juga berpotensi memasuki sistem tanah adalah **pestisida** (Dermiyati, 2002; 2003; Sriyani, 2008a; 2008b). Pestisida mencakup insektisida, herbisida, dan fungisida. Sebagian pestisida mudah terurai di dalam tanah, namun sebagian lagi sulit terurai atau memiliki persistensi yang cukup panjang, sehingga akan berada di dalam tanah dalam jangka waktu yang cukup lama, khususnya bila terikat kuat oleh koloid tanah. Sebagian lagi akan mengalami pergerakan di dalam tubuh tanah dan mencapai Air Bawah Tanah sehingga mengakibatkan pencemaran, atau bergerak bersama air limpasan permukaan sehingga dapat menimbulkan dampak yang lebih luas.

Mobilitas pestisida di dalam tubuh tanah ditentukan oleh berbagai faktor, di antaranya adalah jenis tanah dan jenis pestisida (Wietersen dkk., 1993; Sriyani dan Salam, 2008a; 2008b). Wietersen dkk. (1993) melaporkan bahwa mobilitas Atrazin > Metolaklor > Alaklor, dipengaruhi oleh konduktivitas hidraulik, kapasitas jerap air, dan kandungan C organik tanah. Semakin mobil akan semakin cepat bagi molekul pestisida mencapai Air Bawah Tanah.

Dari penelitiannya dengan menggunakan Teknik Bioassay, Sriyani dan Salam (2008a; 2008b) memonitor/mendeteksi pergerakan herbisida di dalam tanah dengan menggunakan percobaan kolom. Mereka menemukan bahwa pergerakan herbisida pascatumbuh 2,4-D lebih cepat daripada Paraquat, dan herbisida pratumbuh Ametrin lebih cepat daripada Diuron. Pergerakan keempat jenis herbisida ini lebih cepat di tanah Podsolik Merah Kuning (Ultisol) daripada di tanah Latosol Coklat (Ultisol). Perbedaan kecepatan pergerakan keempat jenis herbisida ini di dalam tanah kemungkinan disebabkan karena tanah PMK mengandung lebih banyak pasir (Pasir 72,0%) dibandingkan dengan tanah Latosol Coklat (Pasir 31,0%). Selain itu, KTK tanah Latosol Coklat yang digunakan juga lebih tinggi daripada KTK tanah PMK. [~].

Daftar Pertanyaan Utama

1. Mengapa tanah harus dipelihara?
2. Apakah yang dimaksud dengan Konservasi Tanah?
3. Jelaskan bagaimana proses terjadinya Erosi Tanah?
4. Apakah yang disebut dengan Infiltrasi, Perkolasi, dan Limpasan Permukaan?
5. Sebut dan jelaskan jenis-jenis erosi tanah!
6. Sebut dan jelaskan masing-masing jenis erosi oleh angin!
7. Apakah yang disebut erosi antropogenik? Jelaskan!
8. Bagaimanakah cara untuk mengurangi dampak buruk erosi terhadap kesuburan tanah? Jelaskan!
9. Apakah yang disebut dengan USLE? Apa kegunaannya? Jelaskan!
10. Bagaimanakah pengaruh beberapa faktor berikut terhadap proses erosi: kandungan bahan organik, pasir kasar, pasir halus dan debu, dan liat?
11. Bagaimanakah hubungan antara kecepatan erosi tanah dengan panjang lereng dan sudut kelerengan? Jelaskan!
12. Bagaimana pengaruh persentase penutupan tanah oleh tanaman terhadap kecepatan erosi? Jelaskan!
13. Jelaskan masing-masing cara untuk mengatasi atau mengurangi erosi tanah oleh air!
14. Bagaimana pengaruh olah tanah terhadap kecepatan erosi tanah oleh air?
15. Bagaimana cara untuk mengontrol erosi oleh angin? Jelaskan!
16. Apakah yang disebut dengan pemadatan tanah? Apa pengaruhnya terhadap pergeseran sifat-sifat fisika, kimia, dan biologi tanah? Jelaskan!
17. Bagaimana cara untuk mengurangi kepadatan tanah? Jelaskan!
18. Bagaimana pengaruh pengolahan tanah terhadap sifat-sifat fisika, kimia, dan biologi tanah?
19. Bagaimanakah hubungan antara konsentrasi ion bebas logam dengan pH tanah?
20. Bagaimana pencemaran antropogenik bisa terjadi? Apa pengaruhnya terhadap tanah? Jelaskan!
21. Jelaskan jenis-jenis mulsa dan manfaatnya dalam menurunkan kecepatan erosi tanah!
22. Bandingkan keefektifan penutupan tanah dengan vegetasi dibandingkan dengan mulsa dalam menekan laju erosi tanah!
23. Jelaskan bagaimana logam berat dapat memasuki lingkungan dan akhirnya dapat terakumulasi di dalam tubuh manusia!
24. Jelaskan pengaruh biologis logam berat asal limbah industri di dalam tanah!
25. Jelaskan potensi pencemaran Teluk Lampung dan Teluk Jakarta oleh logam berat asal limbah industri!
26. Jelaskan bagaimana cara mengurangi dampak pencemaran oleh logam berat dengan penambahan pupuk fosfat!
27. Bagaimana pengaruh pengapuran terhadap imobilisasi dan translokasi logam berat di dalam tanah? Jelaskan!

28. Bagaimana pengaruh penambahan biosolid terhadap imobilisasi dan translokasi logam berat di dalam tanah? Jelaskan!
29. Apakah yang disebut Fitoremediasi? Jelaskan!
30. Apakah yang disebut Fitoekstraksi? Jelaskan penggunaannya dalam menurunkan konsentrasi logam berat pencemar!
31. Sebutkan beberapa jenis tanaman hiperakumulator! Apa manfaat tanaman seperti ini?
32. Apa yang disebut pestisida? Apa juga yang disebut insektisida, herbisida?
33. Bagaimana bahaya penggunaan pestisida secara berlebihan? Jelaskan!
34. Faktor-faktor apa saja yang memengaruhi keberadaan pestisida di dalam tanah? Jelaskan!
35. Apakah pestisida di dalam tanah mengalami translokasi? Faktor-faktor apa saja yang memengaruhinya?
36. Kecepatan translokasi pestisida sangat ditentukan oleh jenis tanah. Jelaskan mengapa demikian!
37. Mengapa Nisbah A/T meningkat dengan meningkatnya Cu dan Zn akibat dari penambahan limbah industri berlogam berat.
38. Bagaimana distribusi serapan Cu dan Zn di dalam jaringan tanaman rumput gajah? Mengapa demikian?

“..... Kami hidupakan dengan air itu TANAH yang mati (kering)”
(QS Qaaf [50]:11)

Bab XI: PENUTUP

- 11.1 Tanah adalah Sumberdaya Alam Tak Tebarukan
 - 11.2 Pemanfaatan dan Pemeliharaan Tanah
 - 11.3 Membatasi Konversi Tanah
- Daftar Pertanyaan Utama*

11.1 Tanah adalah Sumberdaya Alam Tak Tebarukan

Tanah adalah sebuah sumberdaya alam tak terbarukan yang bersifat unik. Unik karena tanah terbentuk dari bahan induk di bawah pengaruh intensif berbagai faktor selama ratusan bahkan ribuan tahun. Tanah memiliki berbagai sifat fisika, kimia, dan biologi yang memungkinkan tanah dapat dimanfaatkan untuk berbagai kepentingan. Tanah memiliki struktur dan membentuk pori-pori tanah yang sangat mendukung penyimpanan air dan hara serta menopang kehidupan mikroorganisme dan makroorganisme tanah serta akar tanaman. Tanah juga memiliki koloid tanah yang bersifat organik dan nir-organik dengan permukaan aktif yang sangat luas, yang berguna untuk penyimpanan sementara unsur hara pupuk dan mengurangi pengaruh pencemaran oleh berbagai logam berat serta berbagai senyawa toksik. Tanah juga mengandung berbagai

Abdul Kadir Salam – 2020

mikroorganisme tanah dan kehidupan lain seperti cacing, semut, tikus, dan marmut yang bermanfaat dalam pengelolaan pertanian dan lingkungan.

Pertanian tidak dapat dilangsungkan tanpa kehadiran tanah, sehingga tanah menjadi satu-satunya sumber unsur hara bagi tanaman pertanian: *No Soil No Food*, kalau tidak ada tanah maka tidak akan ada makanan dan tidak akan ada pula kehidupan. Oleh karena itu di dalam kitab suci disebutkan bahwa manusia diciptakan dari tanah, sehingga sebagian besar unsur-unsur penyusun tubuhnya terdapat juga di dalam tanah. Tanpa tanah yang bagus, yang tidak memiliki sifat-sifat fisika, kimia, dan biologi yang bagus, tidak akan ada makanan berkualitas; dan karenanya tidak akan ada pula kehidupan yang bagus. Alam telah membuktikan bahwa makanan berkualitas terdapat hanya di atas tanah yang bagus. Kehidupan yang maju dan berkualitas juga berkembang di wilayah dengan tanah yang bagus.

Tanah juga memiliki arti yang sangat besar dalam pengelolaan lingkungan hidup. Sampah organik yang 'bergunung-gunung', baik yang berasal dari wilayah pertanian atau pun perkotaan, dapat diolah di dalam tanah. Ini terjadi karena tanah adalah sebuah sistem jaringan hidup, yang di dalamnya terdapat berbagai mikroorganisme. Sebagian dari mikroorganisme ini berperan sebagai dekomposer yang dapat menghancurkan struktur bahan organik menjadi bahan-bahan nir-organik, yang pada gilirannya dapat dimanfaatkan oleh tanaman dan kembali memasuki rantai makanan. Unsur-unsur hara yang berasal dari dekomposisi bahan organik 'sampah' akhirnya bergerak di dalam rantai makanan melalui jaringan tanaman, hewan, dan manusia yang saling mengonsumsi. Pada saatnya unsur hara akan kembali menjadi bahan organik yang didekomposisi kembali oleh dekomposer. Dengan demikian, terjadilah sebuah siklus atau daur unsur hara, yang bekerja mengikuti hukum kekekalan massa.

Dari sudut pandang pengelolaan lingkungan, tanah juga merupakan sebuah prosesor alami yang dapat membersihkan bahan-bahan beracun sehingga hasil akhirnya tidak membahayakan lingkungan. Misalnya, logam berat di dalam berbagai limbah dapat diimobilisasi di dalam sistem tanah. Ini karena koloid tanah memiliki kemampuan luar biasa dalam menyaring logam berat dalam limbah. Logam berat diikat oleh koloid tanah atau dikompleks dan kemudian diendapkan oleh berbagai ligan yang terdapat di dalam sistem tanah. Kedua proses ini saja sudah cukup untuk menetralkan logam berat supaya tidak larut dan terhindar dari penyerapan oleh tanaman maupun pencucian oleh air perkolasi yang berpotensi mencemari Air Bawah Tanah.

Bila karena suatu sebab tanah 'rusak' maka akan sangat sulit untuk mengembalikan kepada sifatnya semula. Sifat-sifat fisika, kimia, dan biologi tanah tidak dapat kembali seperti semula: agregasi dan struktur tanah terganggu,

Abdul Kadir Salam – 2020

porositas tanah menurun, koloid tanah tidak berperan maksimum akibat rendahnya pH tanah, pH tanah terlalu asam, kandungan bahan organik tanah menurun drastis, dan kehidupan biologi bergeser. Contoh-contoh kerusakan tanah ini hanya sedikit yang dapat disebut namun sangat memengaruhi berbagai fungsi tanah.

Oleh karena itu, tanah harus dipelihara. Pemeliharaan ini tentunya tidak dapat dilakukan oleh mereka yang tidak memahami ilmu tanah, tetapi dapat dilakukan dengan mudah oleh mereka yang memahami ilmu tanah dengan dukungan pemerintah dan swasta. Pemeliharaan ini harus dapat menciptakan atau memelihara sifat fisika, kimia, dan biologi dalam kondisi yang ideal, sehingga tanah dapat menopang kehidupan dan melaksanakan tugas-tugas lainnya dengan baik.

11.2 Pemanfaatan dan Pemeliharaan Tanah

Karena bila rusak sulit diperbaharui, tanah harus dipelihara dengan sebaik-baiknya. Pemahaman terhadap kata 'sebaik-baiknya' adalah pemanfaatan tanah harus dilakukan dengan bijak, dengan menggunakan kaidah-kaidah keilmuan tanah sehingga sifat-sifat tanah terpelihara. Dari sisi fisika tanah, pemanfaatan tanah harus dapat memelihara sifat fisika utama yang penting di antaranya agregasi dan struktur tanah, porositas tanah, kelembaban tanah, dan seterusnya sehingga tanah tidak akan rentan terdegradasi oleh berbagai proses fisika seperti percikan air hujan atau irigasi, infiltrasi, perkolasi dan pencucian, dan erosi. Dari sisi kimia, pemanfaatan tanah juga harus menghindari perubahan pH tanah yang ekstrim, pencucian unsur hara yang berlebihan, perubahan ketersediaan unsur hara yang ekstrim sehingga menyebabkan defisiensi atau sebaliknya keracunan; juga perubahan tajam dalam KTK, KB, dan K-AI, yang sangat berkaitan dengan ketersediaan unsur-unsur hara yang diperlukan untuk pertumbuhan dan perkembangan tanaman.

Pemanfaatan tanah untuk pertanian pada dasarnya akan 'menguras' unsur hara dari dalam tanah. Oleh karena itu, perlu diperhatikan kesetimbangan unsur hara tersedia, yang merupakan perimbangan antara faktor masukan dan faktor keluaran (**Gambar 11.1**). Neraca keluaran dan masukan dijaga agar unsur hara yang keluar karena diserap oleh tanaman dan mekanisme lainnya dapat diimbangi oleh masukan unsur hara dari berbagai sumber internal di dalam sistem tanah.

Sumber pemasukan internal dari dalam sistem tanah yang terpenting dan terbesar adalah pembebasan unsur hara dari struktur mineral melalui proses

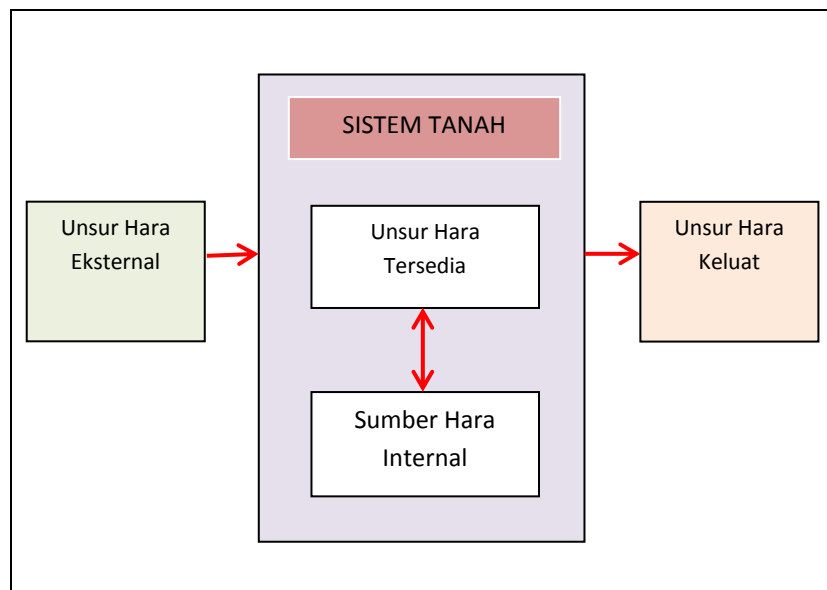
pelapukan. Seperti telah diungkapkan, pelapukan dapat dikelola dengan memanipulasi beberapa sifat mineral dan tanah. Telah ditunjukkan sebelumnya bahwa pelapukan tanah dipengaruhi oleh ukuran partikel tanah, kation dapat dipertukarkan, asam organik larut, dan pH tanah (Mortland and Lawton, 1961; Anderson dan Wiklander, 1975; Munns dkk., 1976; Oster dan Shainberg, 1979; Tan, 1980; Frenkel dll., 1983; Manley dan Evans, 1986; Song dan Huang, 1988; Salam, 1989; Shimard dkk., 1992). Misalnya, telah dilaporkan bahwa akar tanaman dapat mengekstrak P dan unsur hara lainnya dari apatit melalui proses disolusi, yang dipengaruhi oleh: (a) CO₂ yang diekresikan oleh akar tanaman dan mikroorganisme tanah, (b) agen pengelat yang dikeluarkan oleh akar tanaman, (c) adsorpsi dan absorpsi Ca oleh akar tanaman, dan (d) keasaman yang diakibatkan oleh asam yang diekresikan oleh akar tanaman. Oleh karena itu, unsur hara yang tidak dapat dipertukarkan dapat menjadi tersedia bagi tanaman selama pertumbuhan tanaman melalui proses pelapukan tanah (Pratt, 1952; Thomas dan Giddens, 1958; Christensen dan Doll, 1973; Feigenbaum dan Shainberg, 1975; Feigenbaum dkk., 1981; Salam dan Corey, 1993). Dengan demikian, pemanfaatan tanah untuk pertanian dapat sebagian atau sepenuhnya menggunakan masukan unsur hara yang berasal dari sumber-sumber internal di dalam sistem tanah sehingga tanah dapat terpelihara dengan baik.

Pupuk juga dapat digunakan untuk mengimbangi pengeluaran unsur hara dari dalam tanah, khususnya bila sumber-sumber internal tanah tidak dapat memberikan masukan dalam jumlah yang cukup. Namun demikian, penggunaan pupuk memiliki kendala yang cukup banyak. Di samping harganya mahal, pupuk dapat membawa berbagai kontaminan di luar unsur hara target dan dapat merangsang terjadinya proses-proses yang mungkin tidak menguntungkan. Misalnya, pupuk kimia banyak yang mengandung kontaminan logam berat. Penerapan pupuk demikian juga memberikan kontaminan, yang sebenarnya tidak diinginkan. Penggunaan pupuk demikian dalam jangka panjang tentunya akan memberikan ancaman akumulasi yang serius. Penambahan pupuk urea juga dapat menurunkan pH tanah. Karena pH tanah memiliki pengaruh yang sangat besar terhadap misalnya ketersediaan unsur hara, maka penerapan pupuk kimia harus dilakukan secara hati-hati.

Dengan demikian, penambahan pupuk harus dilakukan dengan memperhatikan berbagai pertimbangan. Pertimbangan terpenting adalah yang berkaitan dengan tujuan utama pemupukan yaitu untuk menyediakan unsur hara di dalam tanah sehingga dapat memenuhi seluruh unsur hara yang dibutuhkan untuk pertumbuhan dan perkembangan tanaman serta pemanfaatan hasil tanaman secara aman.

Abdul Kadir Salam – 2020

Sebaliknya, pemanfaatan tanah untuk ‘membuang’ unsur –unsur hara toksik juga harus dilakukan dengan memperhatikan sifat-sifat tanah serta neraca unsur di dalam sistem tanah. Misalnya, pengolahan logam berat dengan menggunakan sistem tanah tidak dilakukan ‘overdosis’. Untuk menghindarinya, kita harus sebelumnya mempelajari ‘Kapasitas Tampung’ sistem tanah terhadap buangan logam berat. ‘Kapasitas Tampung’ ini terkait dengan KTK tanah, semakin tinggi KTK-nya akan semakin banyak logam berat yang dapat diproses di dalam sistem tanah.



Gambar 11.1. Neraca unsur hara dalam sistem tanah.

‘Kapasitas Tampung’ tersebut juga dapat ditingkatkan dengan menggunakan beberapa mekanisme, misalnya dengan menaikkan pH tanah melalui pengapuran atau meningkatkan muatan negatif koloid tanah dengan penambahan bahan organik atau bahan lain yang merupakan sumber muatan negatif (Sumner dkk., 1991; Salam, 2000; 2001). Tanpa memahami ‘kapasitas tampung’ dan cara meningkatkannya, pembuangan logam berat ke dalam sistem tanah dapat

Abdul Kadir Salam – 2020

mengakibatkan *over-supply* unsur tertentu dan pada akhirnya mengakibatkan toksisitas atau pencemaran.

11.3 Membatasi Konversi Tanah

Luasan tanah sangat terbatas; demikian juga luasan tanah yang cocok digunakan sebagai tanah pertanian. Sebaliknya, jumlah penduduk malah terus meningkat; pada tahun 2011 dilaporkan jumlah penduduk bumi telah mencapai 7 Milyar. Demikian juga kebutuhan hidup manusia juga terus meningkat dan berkembang seiring dengan perkembangan ilmu dan teknologi serta kemampuan dan daya beli manusia karena berkembangnya perekonomian dunia. Ketiga hal tersebut merupakan masalah yang bersinergi menjadi gaya yang memberikan tekanan kuat pada eksistensi tanah pertanian.

Jumlah penduduk yang terus meningkat membutuhkan ruang yang lebih luas untuk permukiman dan melaksanakan berbagai aktivitas, yang di wilayah tertentu akhirnya dipecahkan dengan konversi lahan pertanian menjadi lahan permukiman, perdagangan, industri, dan seterusnya. Perkembangan ilmu, teknologi, gaya hidup, dan lain sebagainya juga memberi tekanan yang lebih kuat pada alih fungsi lahan. Di lapang, kondisi ini telah mengakibatkan alih fungsi lahan besar-besaran, dan mengorbankan bahkan lahan pertanian yang subur (Syam dkk., 1997). Sebagian lahan sawah di pantai Utara Jawa Barat, misalnya, saat ini telah banyak dialihfungsikan untuk kepentingan nir-pertanian, padahal wilayah ini merupakan sokoguru produksi beras nasional.

Penyediaan lahan untuk permukiman dan kepentingan nir-pertanian adalah sebuah keharusan. Sebaliknya, memiliki lahan pertanian dengan tanah yang subur dalam jumlah yang cukup luas untuk menopang kebutuhan penduduk sehingga tidak tergantung pada pasokan luar negeri juga merupakan keharusan. Jumlah ini akan terus bertambah seiring dengan bertambahnya jumlah penduduk dan perkembangan teknologi serta ekonomi. Oleh karena itu, kedua hal yang berlawanan ini harus dipadukan agar lahan untuk permukiman dan pemenuhan kebutuhan fasilitas pendukungnya tercukupi namun jumlah lahan yang diperlukan untuk produksi pertanian juga tidak terganggu.

Salah satu cara yang paling tepat untuk mengatasi masalah di atas adalah dengan membiarkan sebagian besar tanah-tanah yang subur seperti Pulau Jawa hanya untuk keperluan pertanian dan menggunakan tanah-tanah yang tidak subur dan tidak cocok untuk pertanian untuk kepentingan nir-pertanian. Cara ini harus

Abdul Kadir Salam – 2020

ditempuh karena tanaman pertanian hanya akan tumbuh, berkembang, dan berproduksi dengan baik pada tanah subur. Solusi ini bukanlah sebuah pemecahan masalah yang sulit untuk dilaksanakan. Yang diperlukan sekarang adalah membangkitkan pemahaman pada para pengelola negara terkait masalah ini dan meningkatkan kemauan politik dan komitmen mereka untuk melaksanakannya secara istiqomah. Kita yang telah memahami tanah dan permasalahannya dengan baik sangat diharapkan untuk dapat melakukan advokasi sehingga eksistensi tanah untuk pertanian tidak dirusak oleh mereka yang awam tentang tanah... [~]

Daftar Pertanyaan Utama

1. Bagaimana pendapat anda tentang fakta bahwa tanah merupakan sumberdaya alam yang unik dan tidak terbarukan?
2. Gambarkan manfaat tanah untuk keperluan pertanian dan pengelolaan lingkungan hidup!
3. Bagaimanakah pemeliharaan tanah dapat dilakukan?
4. Gambarkan neraca hara terkait dengan masukan eksternal, masukan internal, dan keluaran! Bagaimanakah neraca hara yang bagus untuk menjamin pertumbuhan dan produksi tanaman optimum?
5. Gambarkan keuntungan dan kerugian masukan eksternal dalam mengelola neraca hara di dalam sistem tanah!
6. Bagaimana cara mengelola logam toksik di dalam sistem tanah terkait dengan 'kapasitas tampung' tanah terhadap masukan logam toksik asal industri?
7. Bagaimana pendapat Saudara tentang konversi lahan pertanian menjadi lahan nir-pertanian?
8. Menurut Saudara, bagaimana tugas pemerintah dalam pemeliharaan tanah pertanian? Jelaskan!

PUSTAKA RUJUKAN

- Adams, M.L., F.J. Zhao, S.P. McGrath, F.A. Nicholson, dan B.J. Chambers. 2004. Predicting cadmium concentrations in wheat and barley grain using soil properties. *J. Environ. Qual.*, 33:532-541.
- Afandi, R. Widiastuti, dan M. Utomo. 1997a. Upaya rehabilitasi sifat fisika tanah Ultisol melalui pencampuran tanah lapisan atas, lapisan bawah, dan bahan organik. *J. Tanah Trop.*, 4:83-88.
- Afandi, Indarto, Sugiatno, dan M. Utomo. 1997b. Pemadatan tanah pada pertanaman tebu lahan kering Keprasan I akibat penerapan beberapa cara pengolahan tanah dan pemberian mulsa ampas tebu. *J. Tanah Trop.*, 4:89-93.
- Akhter, M.S. dan I.M. Madany. 1992. Heavy metals in street and house dust in Bahrain. *Water Air Soil Pollut.*, 66:111-119.
- Alegre, J.L., B. Pashanasi, dan P. Lavelle. 1996. Dynamics of soil physical properties in Amazonian agroecosystems inoculated with earthworms. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 60:1522-1529.
- Alexander, M. 1977. *Introduction to Soil Microbiology*. Ed. Ke-2. John Willey & Sons, Inc., New York.
- Allaway, W.H. 1986. Food chain aspects of the use of organic residues. Hlm. 283-298. *Dalam* L.F. Elliott dan F.J. Stevenson (Ed.). *Soils for Management of Organic Wastes and Waste Waters*. SSSA, Inc., Madison.
- Allen, H.E., R.H. Hall, dan T.D. Brisbin. 1980. Metal speciation. Effects on aquatic toxicity. *Environ Sci. Technol.*, 14:441-443.
- Alloway, B.J. 1990a. Introduction. Hlm.3-5. *Dalam* B.J. Alloway (Ed). *Heavy Metals in Soils*. Blackie, London.
- Alloway, B.J. 1990b. Soil processes and the behavior of metals. Hlm 7-28. *Dalam* B.J. Alloway (Ed). *Heavy Metals in Soils*. Blackie, London.

Abdul Kadir Salam – 2020

- Alloway, B.J. 1990c. The origins of heavy metals in soils. Hlm. 29-39. *Dalam* B.J. Alloway (Ed). Heavy Metals in Soils. Blackie, London.
- Alloway, B.J. 1990d. Cadmium. Hlm. 100-124. *Dalam* B.J. Alloway (Ed). Heavy Metals in Soils. Blackie, London.
- Amelung, W., W. Zech, X. Zhang, R.F. Follett, T.H. Tiesen, E. Knox, dan K.-W. Flach. 1998. Carbon, nitrogen, and sulfur pools in particle-size fractions as influenced by climate. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 62:172-181.
- Anda, M. 1999. Sifat kimia dan perubahan muatan variasi tanah Ultisols dan Oxisols berdasarkan nilai pH. *J. Tanah Trop.*, 9:77-88.
- Anderson, A. dan L. Wiklander. 1975. Release of crystal constituents by chemical weathering of some soil minerals. *Soil Sci.*, 120:13-19.
- Annabi, M., S. Houot, C. Franco, M. Poitrenaud, dan Y. Le Bissonnais. 2006. Soil aggregate stability improvement with urban composts of different maturities. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 71:413-423.
- Armanto, M.E. 2001. Karakter sifat-sifat tanah yang diusahakan sebagai kebun tebu, hutan, dan lahan alang-alang. *J. Tanah Trop.*, 12:107-115.
- Assouline, S., J. Travares-Fitho, dan D. Tessier. 1997. Effect of compaction on soil physical and hydraulic properties: experimental results and modelling. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 61:390-398.
- Baath, E. 1989. Effect of heavy metals in soil on microbial processes and populations (A Review). *Water Air Soil Pollut.*, 47:335-379.
- Baker, D.E. dan M.C. Amacher. 1982. Nickel, copper, zinc, and cadmium. Hlm. 323-336. *Dalam* A.L. Page, R.H. Miller, dan D.R. Keeney (Ed.). *Methods of Soil Analysis Part 2: Chemical and Microbiological Properties*. Ed. Ke-2. SSSA, Inc., Madison.
- Baker, D.E. 1990. Copper. Hlm 151-176. *Dalam* B.J. Alloway (Ed). Heavy Metals in Soils. Blackie, London.
- Baligar, V.C., R.J. Wright, dan M.D. Smedley. 1988. Acid phosphatase activity in soils of the Appalachian region. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 52:1612-1616.
- Bang, J.S. dan D. Hesterberg. 2004. Dissolution of trace element contaminants from two coastal plain soils as affected by pH. *J. Environ. Qual.*, 33:891-901.
- Banuwa, I.S., H. Novpriansyah, dan A.K. Salam. 2003a. Pengaruh pemberian sisor (*night soil*) terhadap ketersediaan N, P, K, dan hasil tanaman jagung (*Zea mays* L.). *J. Stigma, An Agric. Sci. J.*, 11(2):123-127.
- Banuwa, I.S., M.A. Pulung, dan M. Utomo. 2003b. Pengaruh pemberian sisor (*night soil*) terhadap serapan NPK dan hasil tanaman jagung (*Zea mays* L.). *J. Tanah Trop.*, 16:111-115.
- Banuwa, I.S. dan A.A. Damai. 2003. Pengaruh pemberian sisor (*night soil*) terhadap ketersediaan dan serapan unsur hara NPK serta produksi tanaman kedelai (*Glycine max* L.). *J. Tanah Trop.*, 17:67-72.
- Barber, S.A. 1981. Soil chemistry and availability of plant nutrients. Hlm. 1-12. *Dalam* R.H. Dowdy, J.A. Ryan, V.V. Volk, dan D.E. Baker (Ed.). *Chemistry in the Soil Environment*. ASA Spec. Publ. No. 40. ASA, CSSA, & SSSA, Inc., Madison.

- Barber, S.A. 1984. Liming materials and practices. Hlm. 171-209. *Dalam* F. Adams (Ed.). Soil Acidity and Liming. ASA, CSSA, & SSSA Inc., Madison.
- Bartlett, R.R. 1981. Oxidation-reduction status of aerobic soils. Hlm. 77-102. *Dalam* R.H. Dowdy, J.A. Ryan, V.V. Volk, dan D.E. Baker (Ed.). Chemistry in the Soil Environment. ASA Spec. Publ. No. 40. ASA, SSSA, Inc., Madison.
- Baruah, M. dan P.R. Mishra. 1984. Dehydrogenase and urease activity in rice-field soils. *Soil Biol. Biochem.*, 16:423-424.
- Barzegar, A.K., P.N. Nelson, J.M. Oades, dan P. Rengasany. 1997. Organic matter, sodicity, and clay type: influence of soil aggregation. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 61:1131-1137.
- Baumhardt, R.L. dan R.J. Lascano. 1996. Rain infiltration as affected by wheat residue amount and distribution in ridged tillage. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 60:1908-1913.
- Bendfeldt, E.S., J.A. Burger, dan W.L. Daniels. 2001. Quality of amended mine soils after sixteen years. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 65:1736-1744.
- Benke, M.B., S.P. Indraratne, X. Hao, C. Chang, dan T.B. Goh. 2008. Trace element changes in soil after long-term cattle manure applications. *J. Environ. Qual.*, 37:798-807.
- Benkoli, L., M.J. Trlica, dan J.L. Smith. 1993. Soil loss as affected by different combinations of surface litters and rock. *J. Environ. Qual.*, 22:657-661.
- Benn, T., B. Cavanagh, K. Hristovski, J.D. Posner, dan P. Westerhoff. 2010. The release of nanosilver from consumer products used in the home. *J. Environ. Qual.*, 39:1875-1882.
- Berenguer, S. Cela, F. Santeveri, J. Boixadera, dan J. Lloveras. 2008. Copper and zinc soil accumulation and plant concentration in irrigated maize fertilized with liquid swine manure. *Agron J.*, 100:1056-1061.
- Bernas, S.M. 2011. Effect of coffee pulp compost and terrace on erosion, run-off, and nutrient loss from coffee plantation in Lahat Regency, South Sumatra. *J. Trop. Soils*, 16(2):161-167.
- Berthelson, B.O., L. Ardal, E. Steinnes, G. Abrahamsen, dan A.O. Stuanes. 1994. Mobility of heavy metals in pine forest soils as influenced by experimental acidification. *Water Air Soil Pollut.*, 73:29-48.
- Biasioli, M., H. Greman, T. Kralj, F. Madrid, E. Diaz-Barrientos, and F. Ajmone-Marsan. 2007. Potentially toxic elements contamination in urban soils. *J. Environ. Qual.*, 36:70-79.
- Blaedel, W.J. dan T.J. Hauptert. 1966. Exchange equilibrium through ion-exchange membranes. *Anal. Chem.*, 38:1305-1308.
- Bohn, H.L., B.L. McNeal, dan G.A. O'Connor. 1985. *Soil Chemistry*. Ed. Ke-2. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Bonmati, M., B. Ceccanti, dan P. Nannipieri. 1991. Spatial variability of phosphatase, urease, protease, organic carbon, dan total nitrogen in soil. *Soil Biol. Biochem.*, 23:391-396.
- Boulman, O.T., D. Curtin, C.A. Campbell, V.O. Bjederbeck, dan H. Ukrainetz. 1995. Soil acidification from long-term use of anhydrous ammonia and urea. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 59:1488-1494.
- Bowman, R.S. dan G.A. O'Connor. 1982. Control of nickel and strontium sorption by free metal ion activity. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 46:933-936.

- Brown, A.L., B.A. Krantz, dan J.L. Eddings. 1970. Zinc-phosphorus interactions as measured by plant response and soil analysis. *Soil Sci.*, 110:415-420.
- Brown, S.L., R.F. Chaney, J.S. Angle, dan A.J.M. Baker. 1995. Zinc and cadmium uptake by hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* grown in nutrient solution. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 59:125-33.
- Brown, S.L., R.F. Chaney, J. Hallfrisch, J.A. Ryan, dan W.R. Berti. 2004. In situ soil treatments to reduce the phyto- and bioavailability of lead, zinc, and cadmium. *J. Environ. Qual.*, 33:522-531.
- Brown, S., A. Svendsen, dan C. Henry. 2009. Restoration of high zinc and lead tailings with municipal biosolids and lime: a field study. *J. Environ. Qual.*, 38:2189-2197.
- Brummer, G., K.G. Tiller, U. Herms, dan P.M. Clayton. 1983. Adsorption-desorption and/or precipitation-dissolution processes of Zn in soils. *Geoderma*, 31:337-354.
- Buol, S.W., F.D. Hole, dan R.J. McCracken. 1989. *Soil Genesis and Classification*. Ed. Ke-3. Iowa State Univ. Press, Ames.
- Burns, R.G. 1986. Interaction of enzymes with soil mineral and organic colloids, Hlm. 429-451. *Dalam* P.M. Huang dan M. Schnitzer (Ed.). *Interactions of Soil Minerals with Natural Organics and Microbes*. SSSA Special Publ. No. 17. SSSA, Inc., Madison.
- Buss, W., C. Kammann, dan H.-W. Koyro. 2012. Biochar reduces copper toxicity in *Chenopodium quinoa* Willd. in sandy soil. *J. Environ. Qual.*, 41:1157-1165.
- Cabugao, K.G., C.M. Timm, A.A. Carrell, J. Childs, T-Y.S. Lu, D.A. Pelletier, D.J. Weston, dan R.J. Norby. 2017. Root and rhizosphere bacterial phosphatase activity varies with tree species and soil phosphorus availability in Puerto Rico tropical forest. *Front. Plant Sci.*, <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01834>.
- Cakmak, D., E. Saljnikov, V. Mrvic, M. Jakovljevic, Z. Marjanovic, B. Sikiric, dan S. Maksimovic. 2010. Soil properties and trace elements contents following 40 years of phosphate fertilization. *J. Environ. Qual.*, 39:541-547.
- Cantwell, F.F., J.A. Nielson, dan S.E. Hrudey. 1982. Free nickel ion concentration in sewage by an ion exchange column equilibration method. *Anal. Chem.*, 54:1498-1507.
- Castillo, V.M., M. Martinez-Mena, dan J. Albaladejo. 1997. Runoff and soil loss response to vegetation removal in a semiarid environment. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 61:1116-1121.
- Chan, K.Y. 1997. Consequences of changes in particulate organic carbon in Vertisols under pasture and cropping. *Soil Sci. Soc. Am.J.*, 61:1376-1382.
- Chekai, R.T., L.L. Hendrickson, R.B. Corey, dan P.A. Helmke. 1987a. A method for controlling the activities of free metal, hydrogen, and phosphate ions in hydroponic solutions using ion exchange and chelating resins. *Plant Soil*, 99:321-334.
- Chekai, R.T., R.B. Corey, dan P.A. Helmke. 1987b. Effect of ionic and complexed metal concentrations on plant uptake of cadmium and micronutrient metals from solution. *Plant Soil*, 99:335-345.
- Cheng, S., H. Fang, T. Zhu, J. Zheng, X. Yang, X. Zhang, dan G. Yu. 2010. Effects of soil erosion and deposition on soil organic carbon dynamics at a sloping field in Black Soil region, Northeast China. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 56:521-529.

- Choi, L.S., M. Okazaki, dan N.Y. Yamaguchi. 1999. Relationship between Cu(II) sorption and active H⁺ sorption sites in soils. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 45(3):527-535.
- Christensen, N.B., T.L. Jones, dan G.J. Kauta. 1994. Infiltration characteristics under No-Till and Clean-Till furrow irrigation. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 58:1495-1500.
- Christenson, D.R. dan E.C. Doll. 1973. Release of magnesium from soil clay and silt fractions during cropping. *Soil Sci.*, 116:59-63.
- Corey, R.B. 1964. *Soil Analysis*. (Terjemahan oleh A.K. Salam, 1994). Jurusan Ilmu Tanah Fakultas Pertanian Universitas Lampung, Bandar Lampung.
- Daoust, C.M., C. Bastien, dan L. Deschenes. 2006. Influence of soil properties and aging on the toxicity of copper on compost worm and barley. *J. Environ. Qual.* 35:558-567.
- Dash, M.C., P.C. Mishra, R.K. Mohanty, dan N. Bhatt. 1981. Effect of specific conductance and temperature on urease activity in some Indian soils. *Soil Biol. Biochem.*, 13:73-74.
- Davies, B.E. 1990. *Lead*. Hlm. 177-196. *Dalam* B.J. Alloway (Ed.). *Heavy Metals in Soils*. John Wiley and Sons, Inc., New York.
- Deguchi, S., H. Kawamoto, O. Tanaka, A. Fushimi, dan S. Uozumi. 2009. Compost application increases the soil temperature on bare Andosol in a cool climate region. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 55:778-782.
- Deng, S.P. dan M.A. Tabatabai. 1996. Effect of tillage and residue management on enzyme activities in soils: 1. Amidohydrolases. *Biol. Fert. Soils*, 22:202-207.
- Deer, W.A., R.A. Howie, dan J. Zussman. 1992. *An Introduction to Rock-Forming Minerals*. Longman Scientific & Technical, Hongkong.
- Dermiyati. 2002. Pencucian herbisida pada beberapa jenis tanah tropika Lampung: I. Atrazin. *J. Tanah Trop.*, 15:35-41.
- Dermiyati. 2003. Pencucian herbisida pada beberapa jenis tanah tropika Lampung: III. MCPA. *J. Tanah Trop.*, 17:1-6.
- Diaz, D.A.R., J.E.Sawyer, dan A.P. Mallarino. 2011. On-farm evaluation of poultry manure as a nitrogen source for corn. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 75:729-737.
- Dick, W.A. dan M.A. Tabatabai. 1983. Activation of soil pyrophosphatase by metal ions. *Soil Biol. Biochem.*, 15:359-363.
- Dick, W.A. dan M.A. Tabatabai. 1987. Kinetics and activities of phosphatase-clay complexes. *Soil Sci.*, 14:5-15.
- Direktorat Penyelidikan Masalah Air. 1983. *Pengendalian Pencemaran Logam Berat Daerah Jabotabek dan Teluk Jakarta*. Direktorat Jenderal Pengairan Departemen Pekerjaan Umum. Jakarta.
- Djuangsih, N. 1992. *Pencemaran logam di lingkungan*. Makalah Penataran Ekologi Pencemaran di Universitas Lampung. Bandar Lampung, 3 Des.1992.
- Dowdy, R.H., J.J. Latterell, T.D. Hinesly, R.B. Groesman, dan D.L. Sullivan. 1991. Trace metal movement in an Aeric Ochraqualf following 14 years of annual sludge applications. *J. Environ. Qual.*, 20:119-123.
- Duxbury, J.M. dan R.L. Tate III. 1981. The effect of soil depth dan crop cover on enzymatic activities in pahoee muck. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 45:322-328.

- Edwards, C.A. dan J.R. Lofty. 1977. *Biology of Earthworms*. Ed. Ke-2. John Willey & Sons, Inc., New York.
- Edwards, W.M., M.J. Shipitalo, L.B. Owens, dan W.A. Dick. 1993. Factors affecting preferential flows of water and atrazine through earthworm burrows under continuous no-till corn. *J. Environ. Qual.*, 22:452-457.
- Eivazi, F. dan M.A. Tabatabai. 1990. Factors affecting glucosidase and galactosidase activities in soils. *Soil Biol. Biochem.*, 22:891-897.
- El-Falaky, A.A., S.A. Abouloos, dan W.L. Lindsay. 1991. Measurement of cadmium activities in slightly acidic to alkaline soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 55:974-979.
- Elliott, H.A. 1983. Adsorption behavior of cadmium in response to surface charge. *Soil Sci.*, 136:317-321.
- Ellis, B.G. dan B.D. Knezek. 1982. Adsorption reactions of micronutrients in soils. Hlm. 57-78. *Dalam* J.J. Mortvedt, P.M. Giordano, dan W.L. Lindsay (Ed.). *Micronutrients in Agriculture*. SSSA, Inc., Madison.
- Emerson, W.W., R.C. Foster, dan J.M. Oades. 1986. Organo-mineral complexes in relation to soil aggregation and structure. Hlm. 521-548. *Dalam* P.M. Huang dan M. Schnitzer (Ed.). *Interactions of Soil Minerals with Natural Organics and Microbes*. SSSA Special Publ. No. 17. SSSA, Inc., Madison.
- Fahad, A.A. 1987. Movement of manganese-54 in calcareous soils as affected by leaching solution, lime content, salinization, and sterilization. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 51:1487-1492.
- Fan, X.H. dan Y.C. Li. 2010. Nitrogen release from slow-release fertilizers as affected by soil type and temperature. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 74:1635-1641.
- Fang, S., J. Liu, D. Liu, dan B. Xie. 2010. Enzymatic activity and nutrient availability in the rhizosphere of poplar plantations treated with fresh grass mulch. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 56:483-491.
- Farshadirad, A., E. Dordipour, dan F. Khormali. 2012. Kinetics of non-exchangeable potassium release from soil and its components in some soils of Golestan Province. *J. Water Soil Sci.*, 16:273-285.
- Feigenbaum, S. dan I. Shainberg. 1975. Dissolution of illite – A possible mechanism of potassium release. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 39:985-990.
- Feigenbaum, S., R. Edelstein, dan I. Shainberg. 1981. Release rate of potassium and structural cations from micas to ion exchangers in dilute solutions. *Soil Sci. Am. J.*, 45:501-506.
- Fernandez-Calvino, D., M. Arias-Estevez, M. Diaz-Ravina, dan E. Baath. 2012. Assessing the effects of Cu and pH on microorganisms in highly acidic vineyard soils. *Europ. J. Soil Sci.*, 63:571-578.
- Figura, P. dan B. McDuffie. 1980. Determination of labilities of soluble trace metal species in aqueous environmental samples by anodic stripping voltametry and chelex column and batch methods. *Anal. Chem.*, 52:1433-1439.
- Fitch, A. dan P.A. Helmke. 1989. Donnan equilibrium/graphite furnace atomic absorption estimates of soil extract complexation capacities. *Anal. Chem.*, 61:1295-1298.

- Fliebach, A., R. Martens, dan H.H. Reber. 1994. Soil microbial biomass and microbial activity in soils treated with heavy metal contaminated sewage sludge. *Soil Biol. Biochem.*, 26:1201-1205.
- Fox, T.R. dan N.B. Commerford. 1992. Rhizosphere phosphatase activity and phosphatase hydrolyzable organic phosphorus in two forested Spodosols. *Soil Biol. Biochem.*, 24:579-583.
- Frankenberger, W.T., Jr. dan J.B. Johanson. 1982. Effect of pH on enzyme stability in soils. *Soil Biol. Biochem.*, 14:433-437.
- Frankenberger, W.T., Jr. dan W.A. Dick. 1983. Relationship between enzyme activities and microbial growth and activities indices in soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 47:945-951.
- Frenkel, H., C. Amrhein, dan J.J. Jurinak. 1983. The effect of exchangeable cations on soil mineral weathering. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 47:649-653.
- Friesen, D.K., A.M. Posner, dan J.P. Quirk. 1980. Liming and lime-phosphorus-zinc interactions in two Nigerian Ultisols: 1. Interactions in the soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44:1221-1226.
- Fryrear, D.W. 1995. Soil losses by wind erosion. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 59:668-672.
- Gachene, C.K.K., N.J. Jarvis, H. Linner, dan J.P. Mabuvi. 1997. Soil erosion effect on soil properties in a highland area of Central Kenya. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 61:559-564.
- Garbuio, F.J., D.L. Jones, L.R.F. Alleoni, D.V. Murphy, dan E.F. Caires. 2011. Carbon and nitrogen dynamics in an Oxisol as affected by liming and crop residues under No-Till. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 75:1723-1730.
- Garcia, C., T. Hernandez, F. Costa, B. Ceccanti, dan M. Masciandro. 1993. Kinetics of phosphatase activity in organic wastes. *Soil Biol. Biochem.*, 25:561-565.
- Garrels, R.M. dan C.L. Christ. 1965. *Solutions, Minerals, and Equilibria*. Freeman, Cooper & Co., San Fransisco.
- Ge, H. dan G.G. Wallace. 1988. Separation and detection of metal ions using *in situ* ligand exchange chromatography. *Anal. Chem.*, 61:1295-1298.
- Gimeno-Garcia, E., V. Andreu, dan R. Boluda. 1996. Heavy metals incidence in the application of inorganic fertilizers and pesticides to rice farming soils. *Environ. Pollut.*, 92:19-25.
- Gish, T.J., A. Shirohammadi, R. Vyravipillai, dan B.J. Wienhold. 1995. Herbicide leaching under tilled and no-tillage fields. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 59:895-901.
- Gopalakrishnan, S., T. Watanabe, S.J. Pearce, O. Ito, Z.A.K.M Hossain, dan G.V. Subbaraq. 2009. Biological nitrification inhibition by *Brachiaria humidicola* roots varies with soil type and inhibits nitrifying bacteria, but not other major soil microorganisms. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 55:725-733.
- Gregorich, E.G., D.R. Lapen, B.L. Ma, N.B. McLaughlin, dan A.J. VandenBygaart. 2011. Soil and crop response to varying levels of compaction, nitrogen fertilization, and clay content. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 75:1483-1492.
- Guo, Y., C. Huang, H. Zhang, dan Q. Dong. 2009. Heavy metal contamination from electronic waste recycling at Guiyu, Southern China. *J. Environ. Qual.*, 38:1617-1626.

- Gupta, V.K. dan A. Nayak. 2012. Cadmium removal and recovery from aqueous solutions by novel adsorbents prepared from orange peel and Fe₂O₃ nanoparticles. *Chem. Eng. J.*, 180:81-90.
- Handayani, I.P. dan P. Prawito. 1998. Dinamika mineralisasi karbon dan nitrogen pada lahan alang-alang (*Imperata cylindrica*). *J. Tanah Trop.*, 7:93-102.
- Handayani, I.P. 2001. Comparison of soil quality in cultivated fields and grassland. *J. Tanah Trop.*, 12:135-143.
- Hargrove, W.L. dan G.W. Thomas. 1981. Effect of organic matter on exchangeable aluminum and plant growth in acid soils. Hlm. 151-166. *Dalam* R.H. Dowdy, J.A. Ryan, V.V. Volk, dan D.E. Baker (Ed.). *Chemistry in the Soil Environment*. ASA Spec. Publ. No. 40. ASA, SSSA, Inc., Madison.
- Harisson, A.F. 1983. Relationship between intensity of phosphatase activity and physico-chemical properties in woodland soils. *Soil Biol. Biochem.*, 15:93-99.
- Harpstead, M.I., F.D. Hole, dan W.F. Bennet. 1988. *Soil Science Simplified*. Ed. Ke-2. Iowa State Univ. Press, Ames.
- Hart, H. 1987. *Organic Chemistry A Short Course Seventh Edition*. Houghton Mifflin Co., Boston.
- Hasket, J.D. 1995. The phylosophical basis of soil classification and its evolution. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 59:179-184.
- Hayano, K. 1973. A method for the determination of β-glucosidase activity in soils. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 19:103-108.
- He, Q.B. dan B.R. Singh. 1994. Crop uptake of cadmium from phosphorus fertilizer: II. Relationship with extractable soil cadmium. *Water Air Soil Pollut.*, 74:267-280.
- Helmke, P.A. dan R.B. Corey. 1989. Physical and chemical considerations for the development of lunar-derived soils. Hlm. 193-212. *Dalam* D.W. Ming dan D.L. Henninger (Ed.). *Lunar Base Agriculture: Soils for Plant Growth*. ASA, CSSA, SSSA, Inc., Madison.
- Helmke, P.A., A.K. Salam, dan Y. Li. 1995. Measurement and behavior of indigenous levels of the free, hydrated cations of Cu, Zn, and Cd in the soil-water system. *Third Int. Conf. Biogeochem. Trace Elements*. Paris, 15-19 Mei 1995.
- Helling, C.S., C. Chesters, dan R.B. Corey. 1964. Contribution of organic matter and clay to soil cation-exchange capacity as affected by the pH of the saturating solution. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 28:517-520.
- Herreno, T.C. dan L.F.L. Martin. 1993. Evaluation of cadmium level in fertilized soils. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, 50:61-68.
- Herrick, J.E., dan R. Lal. 1995. Soil physical property changes during dung decomposition in a tropical pasture. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 59:908-912.
- Hidayatullah, M.A. 2020. Ketersediaan dan Serapan Cu dan Zn oleh Rumput Gajah (*Penisstum purpureum*) pada tanah 21 tahun setelah tercemar logam berat dan dikapur. Skripsi. Fakultas Pertanian, Universitas Lampung, Bandar Lampung.
- Hillel, D. 1980. *Fundamentals of Soil Physics*. Academic Press, San Fransisco.

- Hiroki, M. 1994. Populations of Cd-tolerant microorganisms in soils polluted with heavy metals. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 40:515-524.
- Hobara, S., N. Mizuno, Y. Amano, H. Yokota, dan H. Taniyama. 2009. Mercury distribution in tephra soil layers in Hokaido, Japan, with reference to 34,000-year stratification. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 55:582-589.
- Holcomb, J.C., D.M. Sullivan, D.A. Horneck, dan G.H. Clough. 2011. Effect of irrigation rate on ammonia volatilization. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 75:2341-2347.
- Hua, R. dan Z. Li. 2014. Sulfhydryl functionalized hydrogel with magnetism: synthesis, characterization, and adsorption behavior study for heavy metal removal. *Chem. Eng. J.*, 249:189-200.
- Huang, Q., H. Shindo, dan T.B. Goh. 1995. Adsorption, activities, dan kinetics of acid phosphatase as influenced by montmorillonite with different interlayer materials. *Soil Sci.*, 159:271-278.
- Huang, X.F., J.M. Chaparro, K.F. Reardon, R. Zhang, Q. Shen, dan J. Vivanco. 2014. Rhizosphere interactions: root exudates, microbes, and microbial communities. *Botany*, 92:267-275.
- Husnain, A. Rasyidin, S. Prima, dan L.R. Wiidowati. 2003. Pengaruh iklim dan topografi terhadap ketersediaan hara C, N, dan P. *J. Tanah Trop.*, 17:89-101.
- Huysman, F., W. Verstraete, dan P.C. Brookes. 1994. Effect of manuring and increased copper concentration on soil microbial population. *Soil Biol. Biochem.*, 26:103-110.
- Ibaraki, T., N. Kuroyanagi, dan M. Murakami. 2009. Practical phytoextraction in cadmium-polluted paddy fields using a high cadmium accumulating rice plant cultured by early drainage of irrigation water. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 55:421-427.
- Jackson, D.R. dan E.A. Bondietti. 1977. Cd ion activity in soils: evaluation of Cd ion selective electrode. *Environ. Sci. Technol.*, 11:585-587.
- Jha, D.K., G.D. Sharma, dan R.R. Mishra. 1992. Soil microbial population numbers and enzyme activities in relation to altitude and forest degradation. *Soil Biol. Biochem.*, 24:761-767.
- Joner, E.J., J. Magid, T.S. Gahoonia, dan I. Jakobsen. 1995. P depletion and activity of phosphatases in the rhizospheres of mycorrhizal and non-mycorrhizal cucumber (*Cucumis sativus* [L.]). *Soil Biol. Biochem.*, 27:1145-1151.
- Joner, E.J. dan I. Jakobsen. 1995. Growth and extracellular phosphatase activity of arbuscular mycorrhizal hyphae as influenced by soil organic matter. *Soil Biol. Biochem.*, 27:1153-1159.
- Joshi, S.R., G.D. Sharma, dan R.R. Mishra. 1993. Microbial enzyme activities related to litter decomposition near a highway in a sub-tropical forest of north east India. *Soil Biol. Biochem.*, 25:1763-1770.
- Juma, N.G. dan M.A. Tabatabai. 1977. Effect of trace elements on phosphatase activity in soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 41:343-346.
- Juma, N.G. dan M.A. Tabatabai. 1978. Distribution of phosphomonoesterases in soils. *Soil Sci.*, 126:101-108.

- Juracek, K.E. dan A.C. Ziegler. 2006. The legacy of leaded gasoline in bottom sediment of small rural reservoirs. *J. Environ. Qual.*, 35:2092-2102.
- Kabata-Pendias, A. dan H. Pendias. 1992. Trace elements in Soils and Plants. Ed. ke-2. CRC Press, London.
- Kamprath, E.J. 1984. Crop responses to lime on soils in the tropics. Hlm. 349-368. *Dalam* F. Adams (Ed.). Soil Acidity and Liming. Ed. Ke-2. SSSA, Inc., Madison.
- Kambhampati, M.S. dan V.T. Vu. 2013. EDTA enhanced phytoremediation of copper contaminated soils using chickpea (*Cicer arietinum* L.). *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, 91(3):310-313.
- Kardos, L.T., C.E. Scarsbrook, dan V.V. Volk. 1986. Recycling elements in wastes through soil-plant systems. Hlm. 303-324. *Dalam* L.F. Elliott dan F.J. Stevenson (Ed). Soils for Management of Organic Wastes and Waste Water. SSSA Inc., Madison.
- Kasno, A., J.S. Adiningsih, dan S. Mursadi. 1998. Keefektifan waktu pemberian dan jenis fosfat alam pada tanah Plinthic Kandiudults. *J. Tanah Trop.*, 7:59-73.
- Katili, J.A. dan A. Sudrajat. 1984. Galunggung, The 1982-1983 Eruptions. Volcanological Survey of Indonesia, Directorate General of Geology and Mineral Resources, Department of Mines and Energy of Indonesia, Jakarta.
- Keeney, D.R. dan R.E. Wildung. 1986. Chemical properties of soils. Hlm. 74-97. *Dalam* L.F. Elliott dan F.J. Stevenson (Ed). Soils for Management of Organic Wastes and Waste Water. SSSA Inc., Madison.
- Kiekens, L. 1990. Zinc. Hlm. 261-279. *Dalam* B.J. Alloway (Ed). Heavy Metals in Soils. Blackie, London.
- Kien, C.N., N.V. Noi, L.T. Son, H.M. Ngoc, S. Tanaka, T. Nishina, dan K. Iwasaki. 2010. Heavy metal contamination of agricultural soils around a chromite mine in Vietnam. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 56:344-356.
- Kilgour, D.W., R.B. Moseley, M.O. Barnett, K.S. Savage, dan P.M. Jardine. 2008. Potential negative consequences of adding phosphorus-based fertilizers to immobilize lead in soils. *J. Environ. Qual.*, 37:1733-1740.
- Klein, T.M. dan J.S. Koths. 1980. Urease, protease, and acid phosphatase in soil continuously cropped to corn by conventional or no-tillage methods. *Soil Biol. Biochem.*, 12:293-294.
- Kliewer, B.A. dan J.W. Gillian. 1995. Water table management effects on denitrification and nitrous oxide evolution. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 59:1694-1701.
- Korentajer, L., R. Stern, dan M. Aggasi. 1993. Slope effects on cadmium load of eroded sediments and runoff water. *J. Environ. Qual.*, 22:639-645.
- Kotroczo, Z.K., Z. Veres, I. Fekete, Z. Krakomperger, J.A. Toth, K. Lajtha, dan B. Tothmeresz. 2014. Soil enzyme activity in response to long-term organic matter manipulation. *Soil Biol. Biochem.*, 70: 237-243.
- Krauskopf, K.B. 1982. Geochemistry of micronutrients. Hlm. 7-40. *Dalam* J.J. Mortvedt, P.M. Giordano, dan W.L. Lindsay (Ed.). Micronutrients in Agriculture. SSSA, Inc., Madison.

- Kukier, U., R.L. Chaney, J.A. Ryan, W.L. Daniels, R.H. Dowdy, dan T.C. Granato. 2010. Phytoavailability of cadmium in long-term biosolids-amended soils. *J. Environ. Qual.*, 39:519-530.
- Kumari, M., D. Chakraborty, M.K. Gathala, H. Pathak, B.S. Dwivedi, R.K. Tomar, R.N. Garg, R. Singh, dan J.K.Ladha. 2011. Soil aggregation and associated organic carbon fractions as affected by tillage in a rice-wheat rotation in North India. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 75:560-567.
- Kuo, S. dan B.L. McNeal. 1984. Effects of pH and phosphate on cadmium sorption by a hydrous ferric oxide. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 48:1040-1044.
- Lado, M., M. Ben-Hur, dan I. Shainberg. 2004. Soil wetting and texture effects on aggregate stability, seal formation, and erosion. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 68:1992-1999.
- Lagerwerff, J.V. 1982. Lead, mercury, and cadmium as environmental contaminants. Hlm. 593-636. *Dalam* J.J. Mortvedt, P.M. Giordano, dan W.L. Lindsay (Ed). *Micronutrients in Agriculture*. SSSA Inc., Madison.
- Laidlaw, W.S., S.K. Arndt, T.T. Huynh, D. Gregory, dan A.J.M. Baker. 2012. Phytoextraction of heavy metals by willows growing in biosolids under field conditions. *J. Environ. Qual.*, 41:134-143.
- Lampert, J.K. 1982. Measurement of trace cation activities by donnan membrane equilibrium and atomic absorption analysis. *Disertasi Ph.D.* University of Wisconsin-Madison, Wisconsin.
- Landmeyer, J.E., P.M. Bradley, dan F.H. Chapelle. 1993. Influence of Pb on microbial activity in Pb-contaminated soils. *Soil Biol. Biochem.*, 10:1465-1466.
- Le Bayon, R.C. dan F. Binet. 2005. Earthworms change the distribution and availability of phosphorus in organic substrates. *Soil Biol. Biochem.*, 20:1-12.
- Leung, H.W. 1988. Environmental sampling of lead near a battery reprocessing factory. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, 41:427-433.
- Li, Y. dan M. Ghodrati. 1997. Preferential transport of solute through soil columns containing constructed macropores. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 61:1308-1317.
- Lin, C., I. Negev, G. Eshel, dan A. Banin. 2008. In situ accumulation of copper, chromium, nickel, and zinc in soils used for long-term waste water reclamation. *J. Environ. Qual.*, 37:1477-1487.
- Lindsay, W.L. 1979. *Chemical Equilibria in Soils*. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Liu, M., D.E. Kissel, P.F. Vendrell, dan M.L. Cabrera. 2004. Soil lime requirement by direct titration with calcium hydroxide. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 68:1228-1233.
- Luo, J., W. Ran, J. Hu, X. Yang, Y. Xu, dan Q. Shen. 2010. Application of bio-organic fertilizer significantly affected fungal diversity of soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 74:2039-2048.
- Ma, Q.Y. dan W.L. Lindsay. 1990. Divalent zinc ion activity in arid-zone soils obtained by chelation. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 54:719-722.
- Ma, Q.Y. dan W.L. Lindsay. 1993. Measurements of free ionic zinc²⁺ activity in uncontaminated and contaminated soils using chelation. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 57:963-967.

- Ma, Q.Y., S.J. Traina, dan T.J. Logan. 1993. *In situ* lead immobilization by apatite. *Environ. Sci. Technol.*, 27:1803-1810.
- Ma, Q.Y., S.J. Traina, T.J. Logan, dan J.A. Ryan. 1994. Effects of aqueous Al, Cd, Cu, Fe(II), Ni, and Zn in Pb immobilization by hydroxyapatite. *Environ. Sci. Technol.*, 28:1219-1228.
- Ma, Q.Y., T.J. Logan, dan S.J. Traina. 1995. Lead immobilization from aqueous solutions and contaminated soils using phosphate rocks. *Environ. Sci. Technol.*, 29:1118-1126.
- Ma, Q.Y. dan W.L. Lindsay. 1995. Estimation of Cd^{2+} and Ni^{2+} activities in soils by chelation. *Geoderma*, 68:123-133.
- Mackowiak, C.L., P.R. Grossi, dan B.G. Bugbee. 2001. Beneficial effects of humic acid on micronutrient availability to wheat. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 65:1744-1750.
- Malcolm, R.E. 1983. Assessment of phosphatase activities in soils. *Soil Biol. Biochem.*, 15:403-408.
- Manik, K.E.S., K.S. Siswosusanto, dan Afandi. 1997. Degradasi lahan akibat proses erosi antropogenik: Studi kasus pembuatan batu bata di sekitar Bandar Lampung. *J. Tanah Trop.*, 4:95-98.
- Manley, E.P. dan L.J. Evans. 1986. Dissolution of feldspars by low molecular-weight aliphatic and aromatic acids. *Soil Sci.*, 141:106-112.
- Markus, J.A. dan A.B. McBratney. 1996. An urban soil study: heavy metals in glebe Australia. *Aust. J. Soil Res.*, 4:453-465.
- Martens, D.A., J.B. Johansen, dan W.T. Frankenberger, Jr. 1992. Production and persistence of soil enzymes with repeated addition of organic residues. *Soil Sci.*, 153:53-61.
- Mathur, S.P., J.I. MacDougall, dan M. McGrath. 1980. Levels of activities of some carbohydrases, proteases, and phosphatases in organic soils differing copper content. *Soil Sci.*, 129:376-385.
- Mathur, S.P. dan R.B. Sanderson. 1980. The partial inactivation of degradative soil enzymes by residual fertilizer copper in Histosols. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44:750-755.
- Mawardy, A. 2001. Pengaruh tembaga terhadap hasil kedelai (*Glycine max* (L.) Merr) pada Ultisol yang dikapur. *J. Tanah Trop.*, 12:101-106.
- McCalla, T.M., J.R. Peterson, dan C. Lue-Hing. 1986. Properties of agricultural and municipal wastes. Hlm. 10-43. *Dalam* L.F. Elliott dan F.J. Stevenson (Ed). *Soils for Management of Organic Wastes and Waste Water*. SSSA Inc., Madison.
- McCreken, D.V., M.S. Smith, J.H. Grove, C.T. MacKown, dan R.L. Blevins. 1994. Nitrate leaching as influenced by cover cropping and nitrogen sources. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 58:1476-1483.
- McGrath, S.P., J.R. Sanders, dan M.H. Shalaby. 1988. The effects of soil organic matter levels on soil solution concentrations and extractabilities of manganese, zinc, and copper. *Geoderma*, 42:177-188.
- McKeague, J.A., M.V. Cheshire, F. Andreux, dan J. Berthelin. 1986. Organo-mineral complexes in relation to pedogenesis. Hlm. 549-592. *Dalam* P.M. Huang dan M. Schnitzer (Ed.). *Interactions of Soil Minerals with Natural Organics and Microbes*. SSSA Special Publ. No. 17. SSSA, Inc., Madison.

- McLaughlin, M.J., K.G. Tiller, R. Naidu, dan D.P. Stevens. 1996. Review: the behavior and environmental impact of contaminants in fertilizers. *Aust. J. Soil Res.*, 34:1-54.
- Mendonca, E.S. dan D.L. Rowell. 1996. Mineral and organic fractions of two Oxisols and their influence on effective cation-exchange capacity. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 60:1888-1892.
- Milanti, M. 2019. Pengembangan Teknik Analisis Kadar Tembaga dalam Tanah Tropika. Skripsi. Fakultas Pertanian, Universitas Lampung, Bandar Lampung.
- Minami, K. dan K. Araki. 1975. Distribution of trace elements in arable soils affected by automobile exhaust. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 21:185-188.
- Minnich, M.M. dan M.B. McBride. 1987. Copper activity in soil solution: I. Measurement by ion-selective electrode and donnan analysis. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 51:568-572.
- Montiel-Rozas, M.M., E. Madejon, dan P. Madejon.. 2016. Effect of heavy metals and organic matter on root exudates (low molecular weight organic acids) of herbaceous species: An assessment in sand and soil conditions under different levels of contamination. *Environ. Pollut.*, 216:273-281.
- Moore, Jr., P.A. dan W.H. Patrick, Jr. 1989a. Manganese availability and uptake by rice in acid sulfate soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 53:104-109.
- Moore, Jr., P.A. dan W.H. Patrick, Jr. 1989b. Iron availability and uptake by rice in acid soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 53:471-476.
- Mortland, M.M. dan K. Lawton. 1961. Relationships between particle size and potassium release from biotite and its analogous. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 25:473-476.
- Moseley, R.A., M.O. Barnett, M.A. Stewart, T.L. Mehlhorn, P.A. Jardine, M. Ginder-Vogel, dan S. Fendorf. 2008. Decreasing lead bioaccessibility in industrial and firing range soils with phosphate-based amendments. *J. Environ. Qual.*, 37:2116-2124.
- Moyo, C.C., D.E. Kissel, dan M.L. Cabrera. 1989. Temperature effects on soil urease activity. *Soil Biol. Biochem.*, 21:935-938.
- Munn, D.A., L.P. Wilding, dan E.O. McLean. 1976. Potassium release from sand, silt, and clay soil separates. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 40:364-366.
- Najafi-Ghiri, M. dan H.R. Jabari. 2013. Effect of soil minerals on potassium release from soil fractions by different extractants. *J. Arid Land Res. Manag.*, 27:111-127.
- Nannipieri, P., B. Ceccanti, S. Cervelli, dan E. Matarrese. 1980. Extraction of phosphatase, urease, protease, organic carbon, and nitrogen from soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44:1011-1016.
- Nasution, U. 1986. Origin and range of enzymes in soils. Hlm. 51-80. *Dalam* R.G. Burns (Ed.). *Soil Enzymes*. Academic Press, London, New York, San Fransisco.
- Neal, J.L. 1990. Phospatase enzyme activity at subzero temperature in Arctic tundra soils. *Soil Sci. Biochem.*, 22:883-884
- Nelson, D.W. dan L.E. Somner. 1982. Total carbon, organic carbon, dan organic matter. Hlm. 539-579. *Dalam* A.L. Page, R.H. Miller, dan D.R. Keeney (Ed.). *Methods of Soil Analysis Part 2: Chemical and Microbiological Properties*. Ed. Ke-2. SSSA, Inc., Madison.

- Nordstrom, D.K. 1982. Aqueous pyrite oxidation and the consequent formation of secondary iron minerals. Hlm. 37-56. *Dalam* J.A. Kittrick, D.S. Fanning, dan L.R. Hossner (Ed.). Acid Sulfate Weathering. SSSA, Madison.
- Norvell, W.A., H. Dabkowska-Naskret, dan E.E. Cary. 1987. Effect of phosphorus and zinc fertilization on the solubility of Zn^{2+} in two alkaline soils. *Soil Sci. Soc. Am.J.*, 51:584-588.
- Novpriansyah, H. 1999. Ketersediaan P dari berbagai pupuk P akibat pemberian kapur pada tanah Podsolik Jasinga dan pengaruhnya terhadap pertumbuhan jagung. *J. Tanah Trop.*, 9:15-21.
- Novpriansyah, H. 2000. Studi kandungan asam-asam fenolat pada tanah gambut Kalimantan Tengah. *J. Tanah Trop.*, 11:69-73.
- Novpriansyah, H., D.C. Pramono, dan A.K. Salam. 2001. Ketersediaan unsur hara makro dan mikro pada tanah Ultisol Sungkai Utara yang diperlakukan pupuk berbahan baku limbah industri sendok logam, kapur, dan gambut. *J. Tanah Trop.* 13:51-58.
- Nicholson, F.A., K.C. Jones, dan A.E. Johnston. 1994. Effect of phosphate fertilizers and atmospheric deposition on long-term changes in the cadmium content of soil and crops. *Environ. Sci. Technol.*, 28:2170-2175.
- Oaster, J.D. dan D. Shainberg. 1979. Exchangeable cation hydrolysis and soil weathering as affected by exchangeable sodium. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 43:70-75.
- Pakpahan, A. F. 2019. Sebaran Spasial Cu dan Zn dalam Tanah Ultisol Sidosari Lampung Selatan 21 Tahun Setelah Perlakuan Limbah Industri. Skripsi. Fakultas Pertanian, Universitas Lampung, Bandar Lampung.
- Parfitt, R.L., D.J. Giltrap, dan J.S. Whitton. 1995. Contribution of organic matter and clay minerals to the cation exchange capacity of soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 26:1343-1355.
- Park, S.C., T.C. Smith, dan M.S. Bisesi. 1992. Activities of phosphomonoesterase and phosphodiesterase from *Lumbriscus terrestris*. *Soil Biol. Biochem.*, 24:873-876.
- Pratt, P.F. 1952. Release of potassium from non-exchangeable forms from size fractions of several Iowa soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 16:25-29.
- Pratt, P.F., M.D. Thorne, dan F. Wiersma. 1986. Future direction in waste utilization. Hlm. 620-634. *Dalam* L.F. Elliott dan F.J. Stevenson (Ed). *Soils for Management of Organic Wastes and Waste Water*. SSSA Inc., Madison.
- Pang, P.C.K. dan H. Kolenko. 1986. Phosphomonoesterase activity in forest soils. *Soil Biol. Biochem.*, 18:35-40.
- Paterson, E., B.A. Goodman, dan V.C. Farmer. 1991. The chemistry of aluminum, iron, and manganese oxides in acid soils. Hlm. 97-124. *Dalam* B. Ulrich dan M.E. Sumner (Ed.). *Soil Acidity*. Springer-Verlag, New York.
- Penn, C.J., J.G. Warren, dan S. Smith. 2010. Maximizing ammonium nitrogen removal from solution using different zeolites. *J. Environ. Qual.*, 39:1478-1485.
- Pujiyanto, Sudarsono, A. Rachim, S. Sabiham, A. Sastiono, dan J.B. Baon. 2003. Pengaruh bahan organik dan jenis tanaman penutup tanah terhadap bentuk bahan organik tanah,

- distribusi agregat, dan pertumbuhan kakao (*Theobroma cacao* L.). J. Tanah Trop., 17:75-87.
- Quaghebeur, M., A. Rate, Z. Rengel, dan C. Hinz. 2005. Desorption kinetics of arsenate from kaolinite as influenced by pH. J. Environ. Qual., 34:479-486.
- Rabinowitz, M.B. 1993. Modifying soil lead bioavailability by phosphate addition. Bull. Environ. Contam. Toxicol., 51:438-444.
- Reddy, G.B., A. Faza, dan R. Bennet, Jr. 1987. Activity of enzymes in rhizosphere and non-rhizosphere soils amended with sludge. Soil Biol. Biochem., 19:203-205.
- Reddy, G.B. dan A. Faza. 1989. Dehydrogenase activity in sludge amended soil. Soil Biol. Biochem., 21:327.
- Reddy, G.B., R.A. Reinert, dan G. Eason. 1991. Enzymatic changes in the rhizosphere of loblolly pine exposed to ozone and acid rain. Soil Biol. Biochem., 23:1115-1119.
- Rendig, V.V. dan H.M. Taylor. 1989. Principles of Soil-Plant Interrelationships. McGraw-Hill Publ. Co., New York.
- Rhoades, J.D. 1982. Cation exchange capacity. Hlm. 149-157. Dalam L.F. Elliott dan F.J. Stevenson (Ed). Soils for Management of Organic Wastes and Waste Water. SSSA Inc., Madison.
- Richards, J.R., H. Zhang, J.L. Schroder, J.A. Hattey, W.R. Raun, dan M.E. Payton. 2011. Micronutrient availability as affected by the long-term application of phosphorus fertilizer and organic amendments. Soil Sci. Soc. Am. J., 75:927-939.
- Rini, M.V. 2004. Influence of arbuscular mycorrhiza infection on growth, P uptake, and root morphology of oil palm seedlings (*Elaeis guineensis* Jack.). J. Tanah Trop., 18:145-154.
- Robert, M. dan J. Berthelin. 1986. Role of biological and biochemical factors in soil mineral weathering. Hlm. 453-495. Dalam P.M. Huang dan M. Schnitzer (Ed.). Interactions of Soil Minerals with Natural Organics and Microbes. SSSA Special Publ. No. 17. SSSA, Inc., Madison.
- Robinson, Jr. G.R., P. Larkins, C.J. Boughton, B.W. Reed, dan P. L. Sibrell. 2017. Assessment of contamination from arsenical pesticide use on orchards in the Great Valley region, Virginia and West Virginia, USA. J. Environ. Qual., 36:654-663.
- Rosenfeldt, R.R., F. Seitz, R. Schulz, and M. Bundschuh. 2014. Heavy metal uptake and toxicity in the presence of titanium Rodella, A.A., K.R. Fischer, dan J.C. Alcarde. 1995. Cation exchange capacity of an acid soil as influenced by different sources of organic matter. Commun. Soil Plant Anal., 26:2961-2967.
- Rojo, M.J., S.G. Carcedo, dan M.P. Mateos. 1990. Distribution and characterization of phosphatase and organic phosphorus in soil fraction. Soil Biol. Biochem., 22:169-174.
- Rosenfeldt, R.R., F. Seitz, R. Schulz, dan M. Bundschuh. 2014. Heavy metal uptake and toxicity in the presence of titanium dioxide nanoparticles: a factorial approach using *Daphnia magna*. Environ Sci. Technol., 48:6965-6972.
- Ross, D.J. dan A. Cairns. 1982. Effects of earthworms and ryegrass on respiratory and enzyme activities of soil. Soil Biol. Biochem., 14:583-587.

- Ross, S.M. 1994. Sources and forms of potentially toxic metals in soil-plant systems. Hlm. 3-25. *Dalam* S.M. Ross (Ed.). Toxic Metals in Soil-Plant Systems. John Willey & Sons, Ltd., New York.
- Ruby, M.V., A. Davis, dan A. Nicholson. 1994. *In situ* formation of lead phosphates in soils as a method to immobilize lead. *Environ. Sci. Technol.*, 28:646-654.
- Rumpel, C., A. Crème, P.T. Ngo, G. Velasquez, M.L. Mora, dan A. Chabbi. 2015. The impact of grassland management on biogeochemical cycles involving carbon, nitrogen and phosphorus. *J. Soil Sci. Plant Nutr.*, 15(2):Temuco jun.2015 Epub 30-Abr-2015.
- Saeed, M. dan R.L. Fox. 1979. Influence of phosphatase fertilization on zinc adsorption by tropical soils. *Soil Sci. Soc. Am.J.*, 43:683-686.
- Saidy, A.R. dan Badruzsaufari. 2009. Hubungan antara konsentrasi Cr(VI) dan sifat kimia tanah: informasi awal untuk remediasi lahan bekas tambang di Kalimantan Selatan. *J. Tanah Trop.*, 14:97-103.
- Sajise, P.E. 1980. Alang-alang (*Imperata cylindrica* [L.] Beauv.) in upland agriculture. *Proc. Biotrop Workshop on Alang-alang, Bogor*: 35-36.
- Sakai, H. dan T. Tadano. 1993. Characteristics of response of acid phosphatase secreted by roots of several crops to various conditions in the growth media. *Sil Sci. Plant Nutr.*, 39:437-587.
- Salam, A.K. 1989. Relative Rates of Plant Nutrient Release Through Weathering of Soil Minerals. MS Thesis. University of Wisconsin, Madison.
- Salam, A.K. dan R.B. Corey. 1993. The soil potassium-supplying capacities measured by resin methods. *Indon. J. Tropic. Agric.*, 4(2):47-52.
- Salam, A.K. 1993. Residu kadmium dalam tanah 15 tahun setelah tanah diperlakukan dengan limbah industri dan kapur. *Pros. Sem. Nas. Penanganan Limbah Industri Tekstil dan Limbah Organik. Bogor*, 17 Nov. 1993.
- Salam, A.K. dan N. Maswah. 1994. Pengaruh P dan pH terhadap besi dan mangan tersedia pada Ultisol masam dari Lampung. Hlm. 135-142. *Dalam* A. Djausal, M. Utomo, dan Yohannes (Ed.). *Pros. Sem. Mitigasi Bahaya Gempa dan Hasil Penelitian Universitas Lampung, Bandar Lampung*.
- Salam, A.K. dan P.A. Helmke. 1995. Pengukuran aktivitas ion bebas logam berat di dalam larutan tanah dengan metode analisis Donnan. *J. Ilmiah Ilmu Pertanian*, 3(1):13-19.
- Salam, A.K. 1995a. Imobilisasi logam berat di dalam tanah selama 15 tahun. *J. Ilmiah Ilmu Pertanian*, 3(1):20-27.
- Salam, A.K. 1995b. Pola hubungan ketersediaan unsur hara mikro kelompok logam berat dengan pH dan fosfor pada Ultisol Gunung Sugih Lampung Tengah. *J. Pen. Pengb. Wil. Lahan Kering*. 16:1-11.
- Salam, A.K. 1995c. Pengaruh abu vulkan terhadap sifat kimia tanah masam. Hlm. 143-159. *Dalam* A. Djausal, M. Utomo, dan Yohannes (Ed.). *Pros. Sem. Mitigasi Bahaya Gempa dan Hasil Penelitian. Univ. Lampung, Bandar Lampung*.
- Salam, A.K. 1996. Aktivitas enzim fosfatase pada lahan kopi berlereng dengan beberapa teknik pengendalian gulma. *Pros. Konf. HIGI (1996)*:77-84.

- Salam, A.K., S. Djuniwati, J.T. Harahap, dan Suwanto. 1996. Imobilisasi logam berat asal limbah industri di dalam tanah tropika: 1. Sifat kimia limbah industri. *J. Ilmiah Ilmu Pertanian* 4(1):61-67.
- Salam, A.K. 1997a. Faktor logam berat dalam pembuatan dan pemanfaatan pupuk kimia untuk pertanian. Hlm. 103-111. *Dalam* J. Lumbanraja, Dermiyati, S.B. Yuwono, Sarno, Afandi, A. Niswati, S. Yusnaini, T. Syam, dan Erwanto (Ed.). *Pros. Sem. Nas. Identifikasi Masalah Pupuk Nasional dan Standardisasi Mutu yang Efektif*. Bandar Lampung, 22 Des. 1997.
- Salam, A.K. 1997b. Perubahan ketersediaan unsur hara mikro kelompok logam berat dalam tanah akibat perlakuan pupuk fosfat. Hlm. 178-183. *Dalam* J. Lumbanraja, Dermiyati, S.B. Yuwono, Sarno, Afandi, A. Niswati, S. Yusnaini, T. Syam, dan Erwanto (Ed.). *Pros. Sem. Nas. Identifikasi Masalah Pupuk Nasional dan Standardisasi Mutu yang Efektif*. Bandar Lampung, 22 Des. 1997.
- Salam, A.K. 1997c. Perubahan kelarutan timah hitam dan kadmium dalam tanah Andisol dari Gisting Lampung akibat penambahan kapur dan kompos daun singkong. *J. Tanah Trop.*, 5:21-28.
- Salam, A.K., N. Sriyani, M. Heradilla, dan A. Septiana. 1997a. Aktivitas fosfatase di daerah perakaran beberapa gulma tropika yang tercemar timah hitam. *J. Agrivita.*, 20(1):12-16.
- Salam, A.K., A. Iswati, S. Yusnaini, dan A. Niswati. 1997b. Status kesuburan tanah dalam pertanaman singkong (*Manihot esculenta* Crantz) di Gunung Batin Lampung Utara: 1. Tingkat ketersediaan unsur hara. *J. Agrotrop.*, 2(1):35-41.
- Salam, A.K., S. Yusnaini, dan A. Niswati. 1997c. Status kesuburan tanah dalam pertanaman singkong (*Manihot esculenta* Crantz) di Gunung Batin Lampung Utara: 2. Aktivitas enzim tanah. *J. Agrotrop.*, 2(1):42-47.
- Salam, A.K., M.A.S. Arif, dan S. Djuniwati. 1997d. Tinjauan terhadap peranan enzim fosfatase dalam pengelolaan fosfor organik untuk tanaman pertanian. *J. Agrotrop.*, 2(2):38-49.
- Salam, A.K., N. Sriyani, M. Heradilla, dan A. Septiana. 1997e. Alang-alang (*Imperata cylindrica* [L.] Beauv.) mengubah sifat kimia dan biokimia tanah tercemar timah hitam. *Pros III Seminar Nasional Biologi XV, Bandar Lampung (1997):1026-1029*.
- Salam, A.K., A. Watanabe, dan M. Kimura. 1997f. Timah hitam menurunkan aktivitas beberapa jenis enzim tanah. *Pros III Seminar Nasional Biologi XV, Bandar Lampung (1997):1323-1326*.
- Salam, A.K., S. Djuniwati, Sarno, N. Sriyani, H. Novpriansyah, A. Septiana, dan H.D. Putera. 1997g. The DTPA-extractable heavy metals in tropical soils treated with lime materials. *Indon. J. Tropic. Agric.*, 8(1):6-12.
- Salam, A.K., S. Djuniwati, Sarno, N. Sriyani, H. Novpriansyah, A. Septiana, dan D.P. Widiarini. 1997h. The immobilization of heavy metals by a tropical Andepts treated with lime and organic matters. *Indon. J. Tropic. Agric.*, 8(2):24-28.
- Salam, A.K., N. Sriyani, dan M. Heradilla. 1997i. Kelarutan logam berat di daerah perakaran beberapa jenis gulma tropika yang tercemar timah hitam. *J. Tanah Trop.*, 4:117-122.

Abdul Kadir Salam – 2020

- Salam, A.K., S. Djuniwati, Sarno, dan J.T. Harahap. 1997j. Kapur dan kompos daun singkong meningkatkan kelarutan tembaga dan seng asal limbah industri di tanah Andisol dari Gisting Lampung. *J. Tanah Trop.*, 4:123-131.
- Salam, A.K., C. Marintias, Rusdianto, Sunarto, S. Djuniwati, H. Novpriansyah, dan J.T. Harahap. 1997k. Perubahan fraksi labil tembaga asal limbah industri dalam beberapa jenis tanah tropika akibat perlakuan kapur dan kompos daun singkong. *J. Tanah Trop.*, 5:11-20.
- Salam, A.K., S. Djuniwati, Sarno, N. Sriyani, H. Novpriansyah, A. Septiana, D.P. Widiarini, dan H.D. Putera. 1997l. The DTPA-extractable heavy metals in tropical soils treated with lime materials. *Indon. J. Tropic. Agric.*, 8(1):6-12.
- Salam, A.K., S. Djuniwati, Sarno, N. Sriyani, H. Novpriansyah, A. Septiana, dan D.P. Widiarini. 1997m. The immobilization of heavy metals by a tropical Andepts with lime and organic composts. *Indon. J. Tropic. Agric.*, 8(2):24-28.
- Salam, A.K., A. Katayama, dan M. Kimura. 1997n. The activity of soil acid-phosphatase at elevated concentration of heavy metals. *J. Teknik Lingk.*, 3(1):7-12.
- Salam, A.K. 1998a. Peranan kadar air dan waktu inkubasi dalam penetapan aktivitas enzim fosfatase. *J. Tanah Trop.*, 6: 129-134.
- Salam, A.K. 1998b. Tanah Sebagai Pemasok Unsur Hara Tanaman. Jurusan Ilmu Tanah Fakultas Pertanian Universitas Lampung, Bandar Lampung.
- Salam, A.K. dan P.A. Helmke. 1998. The pH dependence of free ionic activities and total dissolved concentrations of copper and cadmium in soil solution. *Geoderma* 83:281-291.
- Salam, A.K., S. Djuniwati, dan Sarno. 1998a. Lowering heavy metal solubilities in tropical soils by lime and cassava-leaf compost additions. *Proc. Environ. Technol. Manag. Sem.:* D2-11.
- Salam, A.K., S. Djuniwati, dan Sinawung. 1998b. Translocation of heavy metals in columns of a tropical soil treated with lime and zeolite. *Jurnal Teknik Lingk.*, 4(1):7-10.
- Salam, A.K., Y. Desvia, R. Subiyantoro, H. Susanto, dan M. Utomo. 1998c. Perubahan aktivitas enzim fosfatase dan α -glukosidase akibat sistem olah tanah jangka panjang. Hlm. 417-422. *Dalam* Z. Irfan, Z. Lamid, D. Jahya, Irawati, dan Ardi (Ed.). *Pros. Sem. Nas. Budidaya Pertanian Olah Tanah Konservasi*. Himpunan Ilmu Gulma Indonesia. Padang.
- Salam, A.K., A. Katayama, dan M. Kimura. 1998d. Activities of some soil enzymes in different land use systems after deforestation in hilly areas of West Lampung, South Sumatra, Indonesia. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 44(1):93-103.
- Salam, A.K., S. Djuniwati, dan Sarno. 1998e. Perubahan kelarutan tembaga dan kadmium dalam kolom tanah dengan perlakuan kapur dan kompos daun singkong akibat pencucian dengan air. *J. Tanah Trop.*, 7:43-50.
- Salam, A.K., C. Marintias, S. Djuniwati, dan J.T. Harahap. 1998f. Perubahan fraksi labil seng asal limbah industri dalam beberapa jenis tanah tropika akibat perlakuan kapur dan kompos daun singkong. *J. Tanah Trop.*, 7:51-57.

- Salam, A.K., J. Susilo, dan N. Sriyani. 1998g. Lead availability and absorption by green kyllinga, corn, and amaranth in Gedongmeneng soil treated with a lead-containing electronics industrial waste and lime. *J. Agrotrop.*, 3(2):19-23.
- Salam, A.K., Sarno, dan N. Sriyani. 1998h. Tanggapan tanaman jagung terhadap limbah industri berlogam berat di tanah Ultisol Sidosari Natar Lampung. *Pros. Sem. Nas. HITI: Optimalisasi Pemanfaatan Sumber Daya Lahan Mendukung Ketahanan Pangan Nasional (1998)*:436-441.
- Salam, A.K., S. Yusnaini, dan Rachmalia. 1998i. Perubahan aktivitas fosfatase selama 16 minggu dalam tanah Ultisol Tanjungan Lampung Barat akibat perlakuan bahan organik. *Pros. Sem. Nas. Peranan Mikrobiologi dalam Agroindustri untuk Menunjang Ketahanan Pangan Nasional (1998)*:332-339.
- Salam, A.K., S. Djuniwati, dan Sarno. 1998j. Lowering heavy metal solubilities in tropical soils by lime and cassava-leaf compost additions. *Proc. Environ. Technol. Manag. Sem. (1998)*:D2-11.
- Salam, A.K., S. Djuniwati, dan H. Novpriansyah. 1998k. Perubahan kelarutan seng asal limbah industri di dalam tanah tropika akibat penambahan kapur dan kompos daun singkong. *J. Tanah Trop.* 6:111-117.
- Salam, A.K. 1999. Perubahan ketersediaan unsur hara mikro kelompok logam berat akibat alih fungsi lahan di Lampung Barat. *Lingk. Pembangunan*, 10(3):176-183.
- Salam, A.K., H.S. Bahri, S. Yusnaini, dan M. Kimura. 1999a. Soil enzymatic activities in young cassava plant rooting zones in Lampung, South Sumatra, Indonesia. Hlm. 73-79. *Dalam C. Ginting, A. Gafur, F.X. Susilo, A.K. Salam, Erwanto, A. Karyanto, S.D. Utomo, M. Kamal, J. Lumbanraja, dan Z. Abidin (Ed.). Proc. Int. Sem. Toward Sustainable Agriculture in Humid Tropics Facing 21st Century. Bandar Lampung, 27-28 September 1999.*
- Salam, A.K., Sarno, N. Kulsum, dan E. Setyaningsih. 1999b. Studi penyerapan Cu dan Zn oleh tanaman bayam (*Amaranthus tricolor* L.) dan jagung (*Zea mays* L.) dari tanah Alfisol Banjar Agung Lampung yang diperlakukan dengan limbah industri berlogam berat. *J. Tanaman Trop.* 2(1):41-51.
- Salam, A.K., Sarno, dan N. Sriyani. 1999c. Greenhouse growth of Amaranth (*Amaranthus tricolor* L.) in soils polluted with heavy metals. *J. Agrotrop.*, 4(1):30-36
- Salam, A.K., Y. Desvia, E. Sutanto, T. Syam, S.G. Nugroho, dan M. Kimura. 1999d. Activities of soil enzymes in different land-use systems in middle terrace areas of Lampung Province, South Sumatra, Indonesia. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 45(1):89-99.
- Salam, A.K., E. Sutanto, Y. Desvia, A. Niswati, Dermiyati, dan M. Kimura. 1999e. Activities of soil enzymes in fields continuously cultivated with cassava, sugarcane, and pineapple in middle terrace areas of Lampung Province, South Sumatra, Indonesia. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 45 (4):803-809.
- Salam, A.K., S. Djuniwati, S. Widodo, dan J.T. Harahap. 1999f. Penurunan kelarutan tembaga asal limbah industri di dalam tanah tropika akibat perlakuan kapur dan kompos daun singkong. *J. Tanah Trop.*, 8:153-160.

- Salam, A.K., N. Sriyani, dan Sarno. 1999g. Pertumbuhan tanaman jagung (*Zea mays* L.) di tanah terpolusi limbah industri berlogam berat. *J. Tanah Trop.*, 8:161-168.
- Salam, A.K., V. Arisanti, dan S. Yumnaini. 1999h. Penurunan aktivitas fosfatase asam di daerah perakaran beberapa jenis tanaman akibat perlakuan kapur dan limbah industri bertimah hitam. *J. Tanah Lingk.*, 2(1):1-6.
- Salam, A.K., N. Sriyani, S. Djuniwati, dan D. Wiharso. 1999i. Pertumbuhan lapang tanaman bayam (*Amaranthus tricolor* L.) di tanah terpolusi oleh logam berat asal limbah industri. *J. Manaj. Kual. Lingk.*, 1(1):49-56.
- Salam, A.K., Suyatno, Handoko, D. Wiharso, dan J.T. Harahap. 2000. Chemical availabilities of phosphorus, manganese, and iron in *Limin LC* treated tropical soils. *J. Tanah Trop.* 10:137-145.
- Salam, A.K. 2000. A four year study on the effects of manipulated soil pH and organic matter contents on availabilities of industrial-waste-origin heavy-metals in tropical soils. *J. Tanah Trop.*, 11:31-46.
- Salam, A.K. 2001. Manajemen Fraksi Logam Berat dalam Tanah untuk Pertanian dan Lingkungan. Pidato Ilmiah Guru Besar. Universitas Lampung, Bandar Lampung.
- Salam, A.K., Afandi, N. Sriyani, dan M. Kimura. 2001. Soil enzymatic activities in a hilly coffee plantation in Lampung Province, South Sumatra, Indonesia, under plant cover management. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 47(4): 695-702.
- Salam, A.K., S. Bakrie, dan F. Prihatin. 2005. Depth-wise distribution of extracted Cu and Zn in cultivated field plots three years after treatment with a Cu- and Zn-containing waste, lime, and cassava-leaf compost. *J. Tanah Trop.*, 11(1):9-14.
- Salam, A.K. 2017. Management of Heavy Metals in Tropical Soil Environment. Global Madani Press. Bandar Lampung. 257hlm.
- Salam, A.K. dan K. Ginanjar. 2018. Tropical Soil labile fractions of copper in experimental plots \pm ten years after application with copper-containing-waste. *J. Trop. Soils*, 23(1):11-18.
- Salinas-Garcia, J.R., F.M. Hons, dan J.E. Matocha. 1997. Long-term effects of tillage and fertilization on soil organic matter dynamics. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 61:152-159.
- Sanchez-Martin, M.J. dan M. Sanchez-Camaza. 1993. Absorption and mobility of cadmium in natural, uncultivated soils. *J. Environ. Qual.*, 22:737-742.
- Sanders, J.R. 1982. The effect of pH upon the copper and cupric ion concentrations in soil solution. *J. Soil Sci.*, 33:679-689.
- Sarkar, J.M., A. Leonowicz, dan J-M. Bollag. 1989. Immobilization of enzymes on clays and soils. *Soil Biol. Biochem.*, 21:223-230.
- Sarno, S. Yumnaini, Dermiyati, dan M. Utomo. 1998. Pengaruh sistem olah tanah dan pemupukan nitrogen jangka panjang terhadap kandungan asam humik dan asam fulvik. *J. Tanah Trop.* 7:35-42.
- Satchell, J.E. dan K. Martin. 1984. Phosphatase activity in earthworm faeces. *Soil Biol. Biochem.* 16:191-194.
- Satchell, J.E., K. Martin, dan R. Krisnamoorthy. 1984. Stimulation of microbial phosphatase production by earthworm activity. *Soil Biol. Biochem.*, 16:195.

- Sauer, T.J., J.L. Hatfield, dan J.H. Prueger. 1996. Corn residue age and placement effect on evaporation and soil thermal regime. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 60:1558-1564.
- Savva, Y., K. Szlavecz, R.V. Pouyat, P.M. Groffman, dan G. Heisler. 2010. Effects of land use and vegetation cover on soil temperature in an urban ecosystem. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 74:469-480.
- Schroder, J.L., H. Zhang, D. Zhou, N. Basta, W.R. Raun, M.E. Payton, dan A. Zazulak. 2008. The effect of long-term annual application of biosolids on soil properties, phosphorus, and metals. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 72:73-82.
- Schroder, J.L., H. Zhang, K. Girma, W.R. Raun, C.J. Penn, dan M.E. Payton. 2011. Soil acidification from long-term use of nitrogen fertilizers on winter wheat. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 75:957-964.
- Scott, D.E., W.A. Dick, dan M.A. Tabatabai. 1985. Inhibition of pyrophosphatase activity in soils by trace elements. *Soil Sci.*, 139:112-117.
- Seta, A.K., R.L. Blevins, W.W. Frye, dan B.J. Barfield. 1993. Reducing soil erosion and agricultural chemical losses with conservation tillage. *J. Environ. Qual.*, 22:661-665.
- Setyawan, D. 2002. Sifat kimia air lindihaan dari percobaan kolom menggunakan tanah bekas tambang emas ameliorasi dengan mineral zeolit. *J. Tanah Trop.* 14:125-133.
- Setyawan, D. 2003. Mineral zeolit untuk ameliorasi tanah bekas tambang emas dalam percobaan kolom ditinjau dari sifat kimia tanah. *J. Tanah Trop.*, 17:29-36.
- Sharpley, A.N., W.W. Troeger, dan S.J. Smith. 1991a. The measurement of bioavailable phosphorus in agricultural run-off. *J. Environ. Qual.*, 20:235-238.
- Sharpley, A.N., S.J. Smith, J.R. Williams, O.R. Jones, dan G.A. Coleman. 1991b. Water quality impacts associated with shorgum culture in Southern Plains. *J. Environ. Qual.*, 20:239-244.
- Sharratt, B. 2011. Size distribution of windblown sediment emitted from agricultural fields in the Columbia Plateau. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 75:1054-1060.
- Shenker, M. dan Y. Chen. 2005. Increasing iron availability to crops: fertilizers, agro-fertilizers, and biological approach. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 51(1):1-17.
- Silver, M., H.L. Ehrlich, dan K.C. Ivarson. 1986. Soil mineral transformation mediated by soil microbes. Hlm. 497-519. *Dalam* P.M. Huang dan M. Schnitzer (Ed.). *Interactions of Soil Minerals with Natural Organics and Microbes*. SSSA Special Publ. No. 17. SSSA, Inc., Madison.
- Simard, R.R., C.R. De Kimpe, dan J. Ziska. 1992. Release of potassium and magnesium from soil fractions and its kinetics. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 56:142-148.
- Simkin, T. dan R.S. Fiske. 1983. *Krakatau 1883, The Volcanic Eruption and Its Effects*. Smithsonian Institution Press, Washington D.C.
- Singer, M.J. dan D. Munns. 1987. *Soils An Introduction*. MacMillan Publ. Co., New York.
- Singh, B. dan G.S. Sekhon. 1977. Adsorption, desorption, and solubility relationship of lead and cadmium in some alkaline soils. *J. Soil Sci.*, 28:271-275.
- Siregar, U.J. dan C.A. Siregar. 2010. *Fitoremediasi: Prinsip dan Prakteknya dalam Restorasi Lahan Paska Tambang di Indonesia*. SEAMEO Biotrop, Bogor.

- Singh, B.R., R.P. Narwal, A.S. Jeng, dan A. Almas. 1995. Crop uptake and extractability of cadmium in soil naturally high in metals at different pH levels. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 26:2123-2142.
- Skoog, A.A. dan D.M. West. 1982. *Fundamentals of Analytical Chemistry*. Ed. Ke-4. CBS College Publ., USA.
- Smolders, E., K. Oorts, E. Lombi, I. Schoeters, dan Y. Ma. 2012. The availability of copper in soils historically amended with sewage sludge, manure, and compost. *J. Environ. Qual.*, 41:506-514.
- Song, S.K. dan P.M. Huang. 1988. Dynamics of potassium release from potassium-bearing minerals as influenced by oxalic and citric acids. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 52:383-390.
- Song, F., X. Han, X. Zhu, dan S.J. Herbert. 2012. Response to water stress of soil enzymes and root exudates from drought and non-drought tolerant corn hybrids at different growth stages. *Can. J. Soil Sci.*, 92: 501–507.
- Sparks, D.L. 1989. *Kinetics of Soil Chemical Processes*. Academic Press, Inc., Toronto.
- Sposito, G. 1989. *The Chemistry of Soils*. Oxford Univ. Press., New York.
- Sriyani, N., Yusnita, dan D.R.J. Sembodo. 1996. Tanggap beberapa jenis tanaman terhadap pengaruh alelopati alang-alang (*Imperata cylindrica*) secara in vitro. *Pros. Konf. HIGI XIII*:260-266.
- Sriyani, N. dan A.K. Salam. 1998. Accumulation of lead and copper and growth of several tropical weeds in a lead contaminated soil treated with lime. *J. Agrotrop.*, 3(2):24-28.
- Sriyani, N. 1999. Perubahan dominansi gulma pada tanah Ultisol Sidosari dan Alfisol Sri Bawono yang tercemar limbah industri berlogam berat. *J. Tanah Trop.*, 8:227-233.
- Sriyani, N. dan A.K. Salam. 2008a. Penggunaan metode bioassay untuk mendeteksi pergerakan hebisida pratumbuh Ametrin dan Diuron dalam tanah. *J. Agrista.*, 12(2):90-100.
- Sriyani, N. dan A.K. Salam. 2008b. Penggunaan metode bioassay untuk mendeteksi pergerakan herbisida pascatumbuh Paraquat dan 2,4-D dalam tanah. *J. Agrista.*, 13(3):199-208.
- Stahl, R.S. dan B.R. James. 1991. Zinc sorption by iron oxide-coated sand as a function of pH. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 55:1287-1290.
- Stehouwer, R., R.L. Day, dan K.E. MacNeal. 2006. Nutrient and trace element leaching following mine reclamation with biosolids. *J. Environ. Qual.* 35:1118-1126.
- Steinnes, E. 1990. Mercury. Hlm. 222-236. *Dalam* B.J. Alloway (Ed). *Heavy Metals in Soils*. Blackie, London.
- Sterk, G. dan W.P. Spaan. 1997. Wind erosion control with crop residues in the sahel. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 61:911-917.
- Stietiya, M.H. dan J.J. Wang. 2011. Effect of organic matter oxidation on the fractionation of copper, zinc, lead, and arsenic in sewage sludge and amended soils. *J. Environ. Qual.*, 40:1162-1171.
- Stott, D.E., W.A. Dick, dan M.A. Tabatabai. 1985. Inhibition of pyrophosphatase activity in soil by trace elements. *Soil Sci.*, 139:112-117.

- Stroo, H.F. dan E.M. Jencks. 1982. Enzyme activity and respiration in mine soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 46:548-553.
- Studdert, G.A., H.E. Echevernia, dan E.M. Casanovas. 1997. Crop-pasture rotation for sustaining the quality and productivity of a Typic Argiudoll. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 61:1466-1472.
- Stumm, W. dan J.J. Morgan. 1981. *Aquatic Chemistry, An Introduction Emphasizing Chemical Equilibria in Natural Waters*. Ed. Ke-2. John Wiley & Sons, New York.
- Sumner, M.E., M.V. Vey, dan A.D. Noble. 1991. Nutrient status and toxicity in acid soils. Hlm. 147-182. *Dalam* B. Ulrich dan M.E. Sumner (Ed.). *Soil Acidity*. Springer-Verlag, New York.
- Supriatin, S. Yusnaini, dan A.K. Salam. 2007. Aktivitas fosfatase dalam kotoran cacing tanah pada lahan kopi dengan beberapa sistem pengelolaan vegetasi penutup tanah. *J. Tanah Trop.*, 12(2):111-120.
- Suryanto dan W. Susetyo. 1997. Perlakuan bahan organik dan tanah mineral pada bahan tailing terhadap ketersediaan unsur hara makro dan unsur logam mikro. *J. Ilmu Tanah Lingk.*, 1:41-45.
- Sweet, C.W., S.J. Vermete, dan S. Landsberger. 1993. Source of toxic trace elements in urban air in Illinois. *Environ. Sci. Technol.*, 27:2502-2510.
- Syam, T., H. Nishide, A.K. Salam, M. Utomo, A.K. Mahi, J. Lumbanraja, S.G. Nugroho, dan M. Kimura. 1997. Land use and cover changes in a hilly area of South Sumatra, Indonesia (from 1970 to 1990). *Soil Sci. Plant Nutr.*, 43:587-599.
- Tabatabai, M.A. 1982. Soil enzymes. Hlm. 903-947. *Dalam* A.L. Page, R.H. Miller, dan D.R. Keeney (Ed.). *Methods of Soil Analysis Part 2: Chemical and Microbiological Properties*. Ed. Ke-2. SSSA, Inc., Madison.
- Tabatabai, M.A. dan M. H. Fu. 1992. Extraction of enzymes from soils. Hlm. 197-227. *Dalam* G. Stotzky dan J.M. Bollag (Ed.). *Soil Biochemistry Vol. 7*. Marcel Dekker, Inc., New York.
- Tack, F.M., O.W.J.J. Calleraert, dan M.G. Verloo. 1996. Metal solubility as a function of pH in contaminated, dredged sediment affected by oxidation. *Environ. Pollut.*, 91:199-208.
- Tan, K.H. 1980. The release of silicon, aluminum, and potassium during decomposition of soil minerals by humic acids. *Soil Sci.*, 129:5-11.
- Tan, K.H. dan P.S. Dowling. 1984. Effect of organic matter on CEC due to permanent and variable charges in selected temperate region soils. *Geoderma*, 32:89-101.
- Tan, K.H. 1986. Degradation of soil minerals by organic acids. Hlm. 1-27. *Dalam* P.M. Huang dan M. Schnitzer (Ed.). *Interactions of Soil Minerals with Natural Organics and Microbes*. SSSA Special Publ. No. 17. SSSA, Inc., Madison.
- Tan, K.H. 1993. *Principles of Soil Chemistry*. Marcel Dekker, Inc., New York.
- Tang, Y., H. Zhang, J.L. Schroder, M.E. Payton, dan D. Zhou. 2007. Animal manure reduces aluminum toxicity in an acid soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 71:1699-1707.
- Tate III, R.L. 1984. Function of protease and phosphatase activities in subsidence of pahoek muck. *Soil Sci.*, 138:271-278.

- Tate III, R.L. 1987. *Soil Organic Matter Biological and Ecological Effects*. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Tate III, R.L., R.W. Parmelee, J.G. Ehrenfeld, dan L. O’Rielly. 1991. Enzymatic and microbial interactions in response to pitch pine root growth. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 55:998-1004.
- Tejada, M., I. Gomez, T. Hernandez, dan C. Garcia. 2010. Utilization of vermicomposts in soil restoration: effects on soil biological properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 74:525-532.
- Thomas, F.H. dan J.W. Giddens. 1958. Release of non-exchangeable Na dan K to exchangeable forms. *Soil Sci.*, 85:273-277.
- Thomas, G.W. 1982. Exchangeable cations. Hlm. 159-165. *Dalam* A.L. Page, R.H. Miller, dan D.R. Keeney (Ed.). *Methods of Soil Analysis Part 2: Chemical and Microbiological Properties*. Ed. Ke-2. SSSA, Inc., Madison.
- Thomas, G.W. dan W.L. Hargrove. 1984. The chemistry of soil acidity. Hlm. 3-56. *Dalam* F. Adams (Ed.). *Soil Acidity and Liming*. ASA, CSSA, and SSSA Inc., Madison.
- Tiller, K.G. 1989. Heavy metals in soils and their environmental significance. Hlm. 113-142. *Dalam* B.A. Stewart (Ed.). *Advances in Soil Science Vol.9*. Springer-Verlag, New York.
- Tiller, K.G. 1989. Heavy metals in soils and their environmental significance. pp. 113-142. *In* B.A. Stewart (Ed.). *Advances in Soil Science Vol.9*. Springer-Verlag, New York.
- Tiller, K.G. 1989. Heavy metals in soils and their environmental significance. pp. 113-142. *In* B.A. Stewart (Ed.). *Advances in Soil Science Vol.9*. Springer-Verlag, New York.
- Tisdale, S.L, W.L. Nelson, dan J.D. Beaton. 1985. *Soil Fertility and Fertilizers*. Ed. Ke-4. Macmillan Publ. Co., New York.
- Tokunaga, T.K., J. Wan, M.K. Firestone, T.C. Hazen, K.R. Olson, D.J. Herman, S.R. Sutton, dan A. Lanzirotti. 2003. In situ reduction of chromium (VI) in heavily contaminated soil through organic carbon amendment. *J. Environ. Qual.*, 32:1641-1649.
- Trasar-Cepeda, M.C. dan F. Gil-Sotres. 1987. Phosphatase activity in acid high organic matter soils in Galicia (NW Spain). *Soil Biol. Biochem.*, 19:281-287.
- Trasar-Cepeda, M.C. dan F. Gil-Sotres. 1988. Kinetics of acid phosphatase activity in various soils of Galicia (NW Spain). *Soil Biol. Biochem.*, 20:275-280.
- Trasar-Cepeda, M.C., T. Carballas, F. Gil-Sotres, dan E. De Blass. 1991. Liming and the phosphatase activity and mineralization of phosphorus in an andic soil. *Soil Biol. Biochem.*, 23:209-215.
- Trehan, S.P. dan G.S. Sekhon. 1977. Effect of clay, organic matter, and CaCO₃ content on Zn adsorption by soils. *Plant Soil*, 46:329-338.
- Treit, J., J.S. Nielson, B. Kratochvil, dan F.F. Canwell. 1983. Semiautomated ion exchange/atomic absorption system for free metal ion determinations. *Anal. Chem.*, 55:1650-1653.
- Tyler, L.D. dan M.B. McBride. 1982. Mobility and extractability of cadmium, copper, nickel, and zinc in organic and mineral soil columns. *Soil Sci.*, 134:198-205.
- Udo, E.J., H.L. Bohn, dan T.C. Tucker. 1970. Zinc adsorption by calcareous soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 34:405-407.

- Vile, M.A., M.J.V. Novak, E. Brizova, R.K. Wieder, dan W.R. Schell. 1995. Historical rates of atmospheric Pb deposition using ^{210}Pb dates peat cores: corroboration, computation, and interpretation. *Water Air Soil Pollut.*, 70:89-106.
- Vinotha, S.P., K. Parthasarathi, dan L.S. Ranganathan. 2000. Enhanced phosphatase activity in earthworm casts is more of microbial origin. *Current Sci.*, 79:1158-1159.
- Walker, T.S., H.P. Bais, E. Grotewold, dan J.M. Vivanco. 2013. Root exudation and rhizosphere biology. *Am. Soc. Plant Biol.*, 32, 44-51.
- Wang, J.D., C.S. Jang, Y.H. Hwang, dan Z.S. Chen. 1982. Lead contamination around a kindergarten near a battery recycling plant. *Bull. Environ. Toxicol.*, 49:23-30.
- Wang, Z., L. Chai, Z. Yang, Y. Wang, dan H. Wang. 2010. Identifying sources and assessing potential risk of heavy metals in soils from direct exposure to children in a mine-impacted city, Changsha, China. *J. Environ. Qual.*, 39:1616-1623.
- Watts, D.B., H.A. Torbert, S.A. Prior, dan G. Huluka. 2010. Long-term tillage and poultry litter impacts soil carbon and nitrogen mineralization and fertility. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 74:1239-1247.
- Welch, J.E. dan L.J. Lund. 1989. Zinc movement in sewage-sludge treated soil as influenced by soil properties, irrigation water quality, dan soil moisture level. *Soil Sci.*, 147:208-214.
- Westermann, D.T. dan R.E. Sojka. 1996. Tillage and nitrogen placement effects on nutrient uptake by potato. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 60:1448-1453.
- Widowati, W., A. Sastiono, dan R.J. Rumampuk. 2008. Efek Toksik Logam: Pencegahan dan Penanggulangan Pencemaran. Penerbit Andi, Yogyakarta.
- Wietersen, R.C., T.C. Daniel, K.J. Femanich, B.D. Girard, K. McSweeney, dan B. Lowery. 1993. Atracine, Alachlor, and Metolachlor mobility through two sandy Wisconsin soils. *J. Environ. Qual.*, 22:811-818.
- Wiharso, D. 1996. Karakteristik tanah merah dari Kebun Percobaan Tanjungan Universitas Lampung, Lampung Selatan. *J. Tanah Trop.*, 3:45-53.
- Wiharso, D. 1998. Prediksi suhu tanah dari suhu udara guna menentukan regim temperatur tanah (Studi kasus daerah Terbanggi Besar Lampung Tengah). *J. Tanah Trop.*, 6:165-170.
- Wiharso, D. dan S.B. Yuwono. 1999. Karakteristik tanah yang terbentuk dari bahan induk sedimen masam tersier pada kondisi tropika basah (Studi kasus daerah Gedong Aji, Lampung Utara). *J. Tanah Trop.*, 9:57-62.
- Wiharso, D. 1999. Perkembangan tanah yang terbentuk dari batuan granit di daerah Lampung Selatan. *J. Tanah Trop.*, 9:117-125.
- Witter, E., W.E. Giller, dan S.P. McGrath. 1994. Long-term effects of metal contamination on soil microorganisms. *Soil Biol. Biochem.*, 26:421-422.
- Workman, S.M. dan W.L. Lindsay. 1990. Estimating divalent cadmium activities measured in arid-zone soils using competitive chelation. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 54:987-993.
- Wu, Y., L. Lu, B. Wang, X. Lin, J. Zhu, Z. Cai, X. Yan, dan Z. Jia. 2011. Long-term field fertilization significantly alters community structure of ammonia-oxidizing bacteria rather than archaea in a paddy soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 75:1431-1439.

Abdul Kadir Salam – 2020

- Xie, R.J. dan A.F. McKenzie. 1990. Zinc sorption, desorption, and fractions in three autoclaved soils treated with pyrophosphate. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 54:71-77.
- Yang, J., R.W. Blanchar, R.D. Hammer, dan A.L. Thomson. 1996. Soybean growth and rhizosphere pH as influenced by A Horizon thickness. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 60:1901-1907.
- Yeh, C.-Y., H.-Y. Chiou, R.-Y. Chen, K.-H. Yeh, W.-L. Jeng, dan B.-C. Han. 1996. Monitoring lead pollution near a storage battery recycling plant in Taiwan Republic of China. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.*, 30:227-234.
- Yusnaini, S. 1998. Pengaruh inokulasi ganda *Rhizobium* dan Mikoriza Vesikular Arbuskular terhadap nodulasi dan produksi kedelai pada tanah Ultisol Lampung. *J. Tanah Trop.*, 7:103-108.
- Yusnaini, A. Niswati, M.A.S. Arif, M. Matsumoto, dan M. Nonaka. 2002. Earthworm population in deforested lands in hilly area of Sumberjaya West Lampung. *J. Tanah Trop.*, 14:141-146
- Yusnaini, S., A.K. Salam, dan M. Nonaka. 2007. Activities of soil enzymes in corn field enriched with manure. *J. ISSAAS* 13(1):18-25.
- Zhang, H., K.H. Hartge, dan H. Ringe. 1997. Effectiveness of organic matter incorporation in reducing soil compactibility. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 61:239-245.
- Zhou, X., Z. He, Z. Liang, P.J. Stoffella, J. Fan, Y. Yang, dan C.A. Powell. 2011. Long-term use of copper-containing fungicide affects microbial properties of citrus grove soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 75:898-906.

TAKARIR

Adsorpsi adalah proses terikatnya sebuah ion pada permukaan aktif dengan muatan yang berbeda, misalnya terikatnya ion Cd^{2+} pada permukaan koloid tanah yang bermuatan negatif. (Lihat **Penjerapan**).

Adsorpsi Spesifik adalah terikatnya sebuah ion dengan menempati dan menggantikan posisi ion tertentu di dalam struktur padatan tertentu. Misalnya terikatnya ion H_2PO_4^- dengan menggantikan posisi OH^- di dalam struktur oksida Al. (Lihat **Penjerapan Spesifik**).

Agregat Tanah adalah satuan massa tanah yang terdiri atas fraksi pasir, fraksi debu, dan fraksi liat yang diikat oleh bahan organik atau mineral liat membentuk bangunan tiga dimensi.

Air Gravitasi adalah air tanah dalam pori tanah di atas kadar air kapasitas lapang yang keluar dari pori tanah akibat gaya gravitasi.

Air Tanah adalah air yang terdapat di dalam pori tanah yang terikat secara kohesi antara molekul air dan secara adhesi dengan partikel tanah.

Air Tersedia adalah jumlah air tanah yang dapat diserap oleh tanaman yang merupakan selisih antara Kadar Air Kapasitas Lapang dan Kadar Air Titik Layu Permanent.

Aktinomisetes adalah mikroorganisme bermiselium yang menyerupai untaian benang yang termasuk dalam kelompok prokariot.

Alfisols adalah order tanah dengan sifat utama kejenuhan basa lebih tinggi daripada 35%.

Abdul Kadir Salam – 2020

Aliran Massa adalah pergerakan massa unsur di dalam tanah bersama dengan pergerakan massa air melalui saluran pori tanah.

Aliran Permukaan adalah pergerakan massa air di permukaan tanah miring akibat lebih tingginya kecepatan presipitasi dibandingkan dengan kecepatan infiltrasi air ke dalam tanah. (Lihat **Limpasan Permukaan**).

Al-Oktahedral adalah bangunan dasar mineral liat silikat yang tersusun oleh satu unsur Al dan 6 buah atom O membentuk bangunan tiga dimensi dengan delapan bidang.

Amonifikasi adalah proses perubahan kimia dari gas NH_3 menjadi ion NH_4^+ yang dapat diserap oleh tanaman.

Analisis Jaringan Tanaman adalah teknik analisis tanah dengan pendugaan berdasarkan kandungan unsur hara di dalam jaringan tertentu dari tanaman pada umur tertentu.

Analisis Tanah adalah teknik pendugaan kandungan atau ketersediaan unsur hara di dalam tanah dengan berbagai macam cara seperti cara kimia dengan bahan kimia tertentu atau dengan cara biologis dengan analisis kandungan unsur hara atau analisis tanggapan tanaman.

Andisols adalah salah satu order tanah dalam Taksonomi Tanah yang berasal dari deposit abu vulkanik yang sebelumnya dimasukkan ke dalam order Inceptisols.

Anion adalah ion yang bermuatan negatif sehingga dapat berinteraksi secara elektrostatis dengan ion bermuatan positif.

Apatit adalah salah satu mineral tanah yang mengandung unsur P dengan formula kimia $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_2(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})$.

Aridisols adalah salah satu order dalam Taksonomi Tanah yang merupakan tanah padang pasir yang berkembang di daerah kering sepanjang tahun.

Asam Fulvik adalah adalah bahan humik tanah yang larut atau tidak mengendap dalam asam encer.

Asam Humik adalah bahan humik tanah yang tidak larut dalam asam encer.

Bahan Humik adalah sisa-sisa tanaman yang telah terdekomposisi dan terdiri atas tiga fraksi yang masing-masing terdiri atas campuran berbagai senyawa organik yang tidak terdeskripsi, yaitu: Humin, Asam Humik, dan Asam Fulvik.

Bahan Induk Tanah adalah batuan dengan kandungan berbagai mineral yang merupakan asal usul tanah dan setelah mengalami proses pelapukan akan menjadi tanah.

Bahan Nir-Humik adalah sisa-sisa tanaman di dalam tanah yang belum terdekomposisi sehingga mudah dikenali.

Bahan Organik adalah bahan humik dan bahan nir-humik di dalam tanah yang bersal dari sisa-sisa tanaman dan hewan, yang tersusun sebagian besar dari unsur C, H, dan O.

Bakteri adalah mikroorganisme bersel satu yang termasuk kelompok Prokariot, berperan penting dalam mendekomposisi sisa tanaman dan merupakan makhluk hidup dengan populasi paling tinggi di dalam sistem tanah

Batuan adalah adalah bahan induk tanah yang mengandung berbagai jenis mineral yang merupakan sumber unsur hara di dalam tanah.

Batuan Basaltik adalah batuan kristalin yang berwarna hitam atau kelabu tua dengan butiran halus yang setelah melapuk akan membentuk tanah berliat merah, lengket, dan subur.

Batuan Gabro adalah batuan kristalin berwarna hitam atau kelabu tua berbutiran kasar yang setelah melapuk akan membentuk tanah berliat dan lengket serta agak merah dan subur.

Batuan Gamping adalah salah satu jenis batuan sedimenter yang mengandung butiran kapur.

Batuan Granit adalah batuan kristalin yang berwarna merah jambu atau kelabu muda yang mengandung kuarsa yang akan membentuk tanah berpasir atau berwarna pucat (mengandung kuarsa) atau kelam (mengandung feromagnesia) yang akan membentuk tanah berliat merah, lengket, dan sbur

Batuan Kristalin adalah batuan yang mengandung berbagai mineral berbentuk kristal, terdiri dari batuan granit, batuan gabro, dan batuan basaltik.

Batuan Lempeng adalah batuan yang terdiri dari kuarsa berukuran liat dan debu plus feldspars, yang mengandung K, Fe, Mg, dan Ca.

Batuan Pasir adalah batuan yang mengandung akumulasi butiran kuarsa yang diikat menjadi satu.

Biokatalisator adalah katalisator yang mempercepat reaksi biokimia, dihasilkan oleh makhluk hidup.

Cat Clay adalah tanah yang mengandung pirit (FeS_2) yang umumnya memiliki pH yang sangat rendah akibat oksidasi pirit. (Lihat **Tanah Sulfat Masam**).

Contour Cropping adalah penanaman tanaman berdasarkan kontur (ketinggian yang sama) untuk mengurangi kecepatan erosi tanah.

Abdul Kadir Salam – 2020

Cukup Hara adalah rentang konsentrasi unsur hara di dalam tanah yang dapat mencukupi kebutuhan tanaman tertentu.

Daerah Perakaran adalah wilayah tanah yang dipengaruhi oleh perakaran tanaman tertentu.

Daur Karbon adalah kesatuan berbagai tahapan proses baik kimia maupun biokimia yang mengubah C dari satu bentuk ke bentuk lain sampai akhirnya mencapai bentuk semula.

Daur Nitrogen adalah kesatuan berbagai tahapan proses baik kimia maupun biokimia yang mengubah N dari satu bentuk ke bentuk lain sampai akhirnya mencapai bentuk semula.

Daur Sulfur adalah kesatuan berbagai tahapan proses baik kimia maupun biokimia yang mengubah S dari satu bentuk ke bentuk lain sampai akhirnya mencapai bentuk semula.

Debu adalah fraksi tanah yang memiliki ukuran butir antara 0.002 – 0.005 mm.

Defisien Hara adalah rentang konsentrasi unsur hara di dalam tanah yang tidak dapat mencukupi kebutuhan tanaman tertentu.

Degradasi Tanah adalah perusakan sifat fisika, kimia, dan/atau biologi tanah akibat berbagai proses destruktif yang bersifat alami dan/atau antropogenik (akibat aktivitas manusia).

Dekhelatisasi adalah proses perubahan kimia spesies unsur dalam bentuk ion khelat menjadi ion bebas di dalam air tanah.

Dekompleksasi adalah proses perubahan kimia spesies unsur dalam bentuk ion kompleks menjadi ion bebas di dalam air tanah.

Dekomposer adalah makhluk hidup, umumnya mikroorganisme, yang berperan mendekomposisi bahan organik di dalam tanah.

Dekomposisi adalah proses perubahan senyawa organik membentuk senyawa yang lebih sederhana dengan membebaskan sebagian unsur penyusunnya dan energi yang dikatalisasi oleh enzim yang diproduksi sebagian besar oleh mikroorganisme.

Denitrifikasi adalah proses perubahan kimia dari NO_3^- di dalam air tanah menjadi N_2 yang kemudian menguap ke atmosfer.

Deret Liotropi adalah urutan afinitas berbagai kation terhadap adsorben yang dipengaruhi oleh muatan dan radius kation sesuai dengan Hukum Coloumb.

Desorpsi adalah proses pembebasan ion yang terjerap oleh adsorben menjadi ion bebas di dalam air tanah.

Deteksi Gejala Defisiensi adalah salah satu teknik analisis tanah dengan menggunakan gejala kekurangan unsur hara pada berbagai bagian tanaman khususnya daun tanaman.

Difusi adalah proses pergerakan unsur hara di dalam tanah dari wilayah dengan konsentrasi tinggi ke wilayah dengan konsentrasi lebih rendah.

Disolusi adalah proses pembebasan unsur dari bentuk endapan menjadi ion bebas yang larut di dalam air tanah. (Lihat **Pelarutan**).

Dispersi adalah disintergrasi partikel-partikel tanah akibat hilangnya gaya pengikat antara partikel-partikel tersebut. Misalnya, dispersi tanah akibat tingginya kandungan Na di dalam tanah.

Distribusi Ukuran Pori adalah penyebaran ukuran pori di dalam tanah antara pori mikro, pori meso, dan pori makro tanah.

Dolomit adalah salah satu jenis bahan kapur dengan formula kimia $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ yang di dalamnya mengandung Ca dan Mg.

Duripan adalah horizon tanah yang keras yang tersusun dari endapan SiO_2 , terdapat di wilayah padang pasir dan wilayah dengan lapisan abu vulkan dengan curah hujan yang sedang.

Eluviasi atau disebut **Horizon E** adalah lapisan yang sangat tercuci di Horizon A yang telah kehilangan banyak liat, Fe, dan Al dan berwarna pucat.

Energi Aktivasi adalah kekuatan seluruh gaya yang harus diatasi dalam suatu reaksi kimia untuk mengubah reaktan menjadi produk karena membatasi keadaan reaktan dengan keadaan produk.

Entisols adalah salah satu order tanah dalam Taksonomi Tanah yang merupakan tanah yang masih sangat muda yang baru berkembang, terdiri dari Horizon A dan Horizon C.

Enzim Tanah adalah senyawa biokimia yang dihasilkan oleh mikroorganisme, akar tanaman, and cacing tanah yang berfungsi sebagai katalisator untuk mempercepat reaksi biokimia tanah tanpa dirinya ikut bereaksi.

Epipedon Histik adalah horizon penciri permukaan yang merupakan lapisan tebal serasah tanaman (20-40 cm) namun tidak dapat dikelompokkan ke dalam tanah organik.

Epipedon Molik adalah Horizon A yang tebal berwarna coklat sangat tua atau hampir hitam karena tingginya kandungan humus dan merupakan horizon diagnostik untuk tanah Mollisols.

Epipedon Okrik adalah Horizon A yang tipis berwarna pucat, yang menunjukkan kekurangan bahan organik.

Abdul Kadir Salam – 2020

Epipedon Umbrik adalah Horizon A yang tebal berwarna coklat sangat tua atau hampir hitam karena tingginya kandungan humus namun memiliki kejenuhan basa yang rendah dan tingkat keasaman yang tinggi.

Erosi adalah proses tergerusnya lapisan atas tanah sebagai akibat tingginya kecepatan aliran permukaan.

Erosi Alur adalah erosi tanah yang terjadi karena aliran air terkonsentrasi dalam alur kecil yang tidak dalam.

Erosi Lembar adalah pengikisan permukaan tanah oleh air tanpa membentuk saluran.

Erosi Parit adalah erosi tanah yang terjadi bila air terkonsentrasi dalam satu saluran dan dapat memperdalamnya secara cepat

Erosi Rayapan Permukaan (*Surface Creep*) adalah erosi oleh angin yang mengakibatkan partikel tanah, khususnya yang berukuran besar, merayap dan menggelinding di permukaan tanah.

Erosi Salto (*Saltation*) adalah erosi tanah oleh angin yang mengakibatkan partikel tanah berpindah dengan meloncat-loncat di permukaan tanah; partikel-partikel ini, yang umumnya berukuran pasir, dapat menghantam tanaman secara bertubi-tubi dan merusak tanah

Erosi Suspensi (*Suspention*) adalah proses erosi tanah oleh angin dengan partikel-partikel yang halus seperti liat dapat tersuspensi di dalam udara dan menghasilkan kabut berdebu yang mengakibatkan partikel-partikel tanah tersebut terangkut jauh dari tempatnya semula

Eukariot adalah mikroorganisme yang mencakup flora dan fauna; mencakup sebagian besar jamur dan protozoa

Evaporasi adalah proses penguapan air dari permukaan tanah.

Evapotranspirasi adalah proses penguapan air dari permukaan tanah dan vegetasi.

Famili adalah salah satu tingkatan klasifikasi tanah setelah Order, Suborder, dan *Great Group*.

Fitoekstraksi adalah penurunan konsentrasi unsur tertentu di dalam air atau tanah dengan menggunakan tanaman hiperakumulator.

Fitoremediasi adalah proses perbaikan tanah yang tercemar dengan menggunakan tanaman hiperakumulator.

Fotosintesis adalah proses pembentukan hidrokarbon di dalam klorofil daun tanaman yang merupakan sintesis antara CO₂, air, dan energi matahari.

Fragipan adalah horizon tanah yang sangat padat sehingga menghambat penetrasi air dan akar tanaman hasil penyusunan yang rapat antara pasir dan debu dan ikatannya yang lemah mengakibatkan horizon ini bersifat rapuh bila kering atau lembab, tetapi kuat bila dalam keadaan basah.

Fungisida adalah senyawa kimia yang berfungsi untuk mengendalikan perkembangan jamur.

Ganggang adalah salah satu mikroorganisme tanah yang termasuk kelompok prokariot, tidak jelas antara flora atau fauna.

Gaya Adhesi adalah gaya tarik menarik antara dua buah zat yang berbeda yang besarnya ditentukan dengan Hukum Coloumb. Misalnya, gaya tarik menarik antara molekul air dengan permukaan tanah.

Gaya Kapiler adalah gaya yang ditimbulkan oleh kombinasi antara gaya kohesi dan gaya adhesi yang dapat mengakibatkan gerakan air melalui saluran pori tanah.

Gaya Kohesi adalah gaya tarik menarik antara zat sejenis yang besarnya ditentukan berdasarkan Hukum Coloumb. Misalnya, gaya tarik menarik antara molekul air.

Gelisols adalah salah satu order tanah dalam Taksonomi Tanah yang merupakan tanah yang berkembang di daerah sangat dingin seperti Siberia, Alaska, dan Kanada dengan akumulasi bahan organik sangat tinggi di lapisan atas sehingga menyebabkannya berwarna hitam atau coklat tua di atas sebuah lapisan mineral yang dangkal.

Genesis Tanah adalah berbagai proses kimia, fisika, dan biologi yang bekerjasama membentuk tanah.

Great Group adalah tingkatan klasifikasi tanah di bawah suborder.

Herbisida adalah senyawa kimia yang berfungsi untuk membasmi atau mengendalikan tanaman pengganggu yang disebut gulma.

Hidrasi adalah proses asosiasi unsur atau senyawa dengan molekul air sehingga unsur atau senyawa tersebut terlapisi oleh air. Misalnya, haloisit ($\text{Al}_4\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), yang memiliki 4 molekul air untuk setiap molekulnya.

Hidrolisis adalah proses kimia yang melibatkan air terhadap sebuah unsur atau senyawa. Misalnya, hidrolisis ion Al^{3+} akan menghasilkan ion AlOH^+ dan H^+ .

Histosols adalah sebuah order dalam Taksonomi Tanah yang merupakan tanah organik, merupakan akumulasi bahan organik di lingkungan yang terlalu basah dan/atau dingin bagi bahan organik untuk dapat terdekomposisi secepat produksinya oleh pertumbuhan tanaman.

Abdul Kadir Salam – 2020

Horizon A adalah Horizon paling atas dari tanah yang terletak di bawah Horizon O dan berkembang dari Horizon B, umumnya disebut topsoil.

Horizon Albik adalah horizon tanah berwarna putih yang terletak di bawah lapisan humus yang gelap dan asam dari Spodosols atau di atas Horizon Spodik yang berwarna coklat tua dengan humus dan/atau sesquioxida melapisi partikel pasir

Horizon Argilik adalah horizon tanah yang mengandung liat dalam jumlah yang lebih besar daripada Horizon A dan juga biasanya lebih besar daripada Horizon C.

Horizon Penciri adalah seperangkat sifat fisika dan sifat kimia tertentu pada horizon permukaan atau horizon sub-permukaan yang menjadi ciri khas suatu jenis tanah.

Horizon Permukaan adalah horizon tanah yang umumnya memiliki simbol A (mungkin dengan Horizon O di atasnya), sebagian memiliki seperangkat sifat fisika dan kimia tertentu yang bermanfaat sebagai Horizon Penciri.

Horizon Sub-Permukaan adalah horizon di bawah permukaan tanah yang secara normal memiliki simbol B dengan diikuti huruf kecil yang menunjukkan jenis perkembangan yang lebih spesifik dari tanah yang bersangkutan, sebagian memiliki seperangkat sifat fisika dan kimia tertentu yang bermanfaat sebagai Horizon Penciri.

Horizon Tanah adalah bagian tanah, biasanya memanjang horizontal, yang menunjukkan keseragaman sifat fisika dan kimia tanah tertentu, misalnya dalam warna tanah, tekstur, dan/atau struktur tanah.

Horizon B adalah horizon tanah yang terletak di bawah Horizon A dan di atas Horizon C, biasanya disebut subsoil.

Horizon C adalah horizon yang terdiri dari pecahan batuan yang terletak di atas Horizon R, yang dengan pelapukan akan berkembang menjadi tanah di Horizon B, disebut juga dengan batuan induk.

Horizon Kalsik adalah horizon tanah yang terbentuk di wilayah agak kering, tersusun dari kalsium karbonat yang tercuci dari lapisan atas.

Horizon Kambik adalah horizon tanah yang terbentuk terkait dengan proses pencucian berbagai bahan dari lapisan atas (A) ke lapisan bawah (B), menunjukkan tingkat pelapukan masih sedang dan endapan bahan cucian dari lapisan atas masih sedikit.

Horizon Kandik adalah horizon tanah yang memiliki liat beraktivitas rendah (kaolinit) sehingga tidak mengikat unsur hara dengan baik.

Horizon Natrik adalah horizon tanah yang terbentuk karena terjadinya dispersi liat akibat tingginya Na di dalam tanah.

Horizon O adalah horizon berupa lapisan bahan organik di atas permukaan tanah yang terletak di atas Horizon A.

Horizon Oksik adalah subsoil yang sangat miskin dengan hampir tanpa mineral primer selain kuarsa

Horizon Petrokalsik adalah horizon tanah yang terbentuk di bentukan lahan yang telah tua di wilayah kering. Lapisan ini telah mengeras seperti batu dan tersusun dari kalsium karbonat yang tercuci dari lapisan atas terutama dari CaCO_3 .

Horizon R adalah horizon batuan masif yang merupakan asal muasal dari Horizon C yang merupakan pecahan batuan.

Horizon Spodik adalah subsoil berwarna coklat kemerahan sampai hitam, disebabkan oleh pelapisan permukaan butiran pasir oleh oksida besi dan aluminium bersama dengan humus.

Hukum Coloumb adalah hubungan gaya tarik menarik atau tolak menolak antara dua muatan yang disarikan dengan formula $F = kq_1q_2/r^2$ dengan F adalah gaya tarik menarik atau gaya tolak menolak, q_1 adalah muatan spesies 1, q_2 adalah muatan spesies 2, r adalah jarak antara q_1 dan q_2 , dan k adalah sebuah konstanta.

Hukum Jenny adalah hubungan proses pembentukan tanah dengan faktor pembentukan tanah yang disarikan $T = f(BI, R, O, W)$ dengan BI adalah bahan induk, R adalah relief, O adalah organisme atau makhluk hidup, dan W adalah Waktu)

Humin adalah Bahan Humik atau bahan organik yang telah terdekomposisi dan tidak larut dalam alkali .

Humus adalah sisa bahan organik tanah yang telah resisten di dalam tanah.

Ikatan Hidrogen adalah ikatan kimiawi yang terjadi antara kutub negatif gugus fungsional sebuah senyawa dengan kutub positif gugus fungsional senyawa lainnya.

Iluviiasi adalah proses pengendapan unsur atau partikel liat yang tercuci dari Horizon A di Horizon B.

Inceptisols adalah salah satu order dalam Taksonomi Tanah yang merupakan tanah muda yang menunjukkan perkembangan lebih lanjut dari Entisols, namun dibandingkan dengan tanah lainnya, tanah ini masih relatif muda.

Infiltrasi adalah proses masuknya air ke dalam tanah melalui pori tanah.

Insektisida adalah senyawa kimia yang dimanfaatkan untuk membasmi atau mengendalikan serangga pengganggu.

Abdul Kadir Salam – 2020

Intersepsi Akar adalah pergerakan unsur hara dengan jarak dekat ke permukaan akar tanaman yang diakibatkan oleh perkembangan akar tanaman menuju ke massa tanah dengan konsentrasi unsur hara tinggi.

Ion Bebas adalah kation atau anion yang tidak berasosiasi dengan spesies lain di dalam air tanah. Misalnya, Cd^{2+} atau H_2PO_4^- .

Ion Dapat Dipertukarkan adalah ion yang terjerap pada permukaan kompleks jerapan yang dapat digantikan oleh ion lain dengan muatan yang sama dalam larutan tanah.

Ion Khelat adalah ion bebas yang berasosiasi dengan spesies organik membentuk spesies baru yang larut di dalam air tanah. Misalnya Cu^{2+} berasosiasi dengan asam fulvik menjadi Cu-Fulvic atau dengan EDTA menjadi Cu-EDTA

Ion Kompleks adalah ion bebas yang berasosiasi dengan spesies inorganik lain membentuk spesies baru yang larut di dalam air tanah. Misalnya Cu^{2+} berasosiasi dengan SO_4^{2-} menjadi CuSO_4^0 .

Jamur adalah salah satu mikroorganisme tanah eukariot.

Kadar Air adalah persentase jumlah air yang mengisi pori-pori per satuan berat tanah.

Kadar Air Kapasitas Lapang adalah kadar air setelah seluruh air gravitasi keluar dari pori tanah pada potensial air sekitar 10 – 35 kPa.

Kadar Air Titik Layu Permanen adalah kadar air tanah pada saat sangat kering dan tanaman mengalami kelayuan permanen (tidak dapat balik) karena tidak dapat menyerap air pada potensial air sekitar 1,520 kPa.

Kalsit adalah salah satu bahan kapur dengan formula kimia CaCO_3 .

Kapasitas Sangga Tanah adalah kemampuan tanah untuk mengimbangi perubahan sifat tanah tertentu. Misalnya Kapasitas Sangga Tanah terhadap perubahan pH, kapasitas sangga tanah terhadap penurunan K larut.

Kapasitas Tukar Anion adalah kemampuan tanah untuk menjerap anion yang diekspresikan dalam satuan $\text{cmol} (-) \text{kg}^{-1}$.

Kapasitas Tukar Kation adalah kemampuan tanah untuk menjerap kation yang diekspresikan dalam satuan $\text{cmol} (+) \text{kg}^{-1}$.

Karbonasi adalah reaksi penggantian kation dalam struktur mineral silikat primer oleh ion H^+ yang berasal dari H_2CO_3 yang merupakan hasil reaksi antara molekul H_2O dan CO_2 .

Kation adalah ion yang bermuatan positif. Misalnya, Ca^{2+} , Cd^{2+} .

Kation Dapat Dipertukarkan adalah kation yang terjerap pada permukaan koloid tanah yang dapat dipertukarkan oleh kation lain di dalam larutan tanah.

Kejenuhan Aluminium adalah kepekatan Al-dd yang dijerap oleh koloid tanah yang merupakan persentase Al-dd terhadap KTK tanah.

Kejenuhan Basa (KB) adalah kepekatan kation-kation basa yang dijerap oleh koloid tanah yang merupakan persentase jumlah basa-basa terjerap dari KTK.

Kekelokan (Tortuosity) derajat kelangsungan jarak hubungan antara dua buah titik dalam tanah melalui pori-pori tanah yang saling berhubungan.

Kelas Tekstur adalah pengelompokan sifat fisika tanah yang menunjukkan komposisi fraksi pasir, fraksi debu, dan fraksi liat tanah dan ditentukan dengan menggunakan Segitiga Tekstur.

Kerapatan Isi (Bulk Density) adalah perbandingan antara Massa Partikel Tanah dengan Volume Total tanah.

Kerapatan Partikel (Particle Density) adalah perbandingan antara Massa Partikel Tanah dengan Volume Padatan tanah

Khelatisasi adalah pembentukan khelat yang merupakan reaksi antara ion bebas dengan agen pengelat.

Klasifikasi Tanah adalah pengelasan tanah berdasarkan sifat-sifat morfologi, fisika, dan kimia sehingga memunculkan nama tanah dengan susunan Order – Suborder – *Great Group* – *Family*.

Klorosis adalah pemucatan warna hijau daun akibat defisiensi N pada tanaman.

Kompleksasi adalah proses pembentukan ion kompleks yang merupakan reaksi antara ion bebas dan agen pengelat. Misalnya, Cd^{2+} dan Cl^- membentuk CdCl_3^- .

Konsentrasi Kritis (KK) adalah konsentrasi unsur hara di dalam jaringan tanaman tertentu pada umur tanaman tertentu yang menunjukkan batas minimal kecukupan unsur hara. Bila konsentrasi unsur hara di dalam jaringan tanaman lebih besar daripada KK maka tanaman tidak akan mengalami kekurangan unsur hara.

Konservasi Tanah adalah ilmu atau teknik untuk memelihara sifat-sifat fisika, kimia, dan biologi tanah.

Konsistensi Tanah adalah derajat kekerasan tanah pada saat kering, keremahannya bila lembab, dan kelengketan atau elastisitasnya bila basah.

Konsumsi Mewah (*Luxury Consumption*) adalah fenomena serapan unsur hara oleh tanaman di atas batas optimal tetapi tanpa peningkatan pertumbuhan dan/atau hasil tanaman.

Larutan Penyangga adalah larutan yang dapat menahan perubahan pH sampai derajat tertentu akibat pengenceran/pengentalan atau penambahan sedikit asam atau sedikit basa.

Legume adalah tanaman polong-polongan.

Liat adalah fraksi tanah yang paling halus dengan ukuran butir $< 2 \mu\text{m}$ atau 0.002 mm.

Lichen adalah jenis simbiosis lain antara jamur dan ganggang hijau biru, yang merupakan pionir, yang dapat hidup di atas batu karena dapat memiksasi N dari udara dan melarutkan unsur hara dari batuan

Limpan Permukaan adalah aliran air di permukaan tanah (umumnya tanah miring) diakibatkan oleh lebih tingginya curah hujan daripada kecepatan infiltrasi air ke dalam tanah. (Lihat **Aliran Permukaan**).

Logam Berat adalah kelompok logam dengan berat jenis $> 5 \text{ g cm}^3$.

Mikoriza adalah simbiosis mutualisme antara jamur dengan akar tanaman.

Mineral Liat Bukan Silikat adalah mineral sekunder tak bersilikat yang dihasilkan melalui pengendapan kombinasi antara beberapa produk pelapukan mineral primer dan/atau mineral sekunder.

Mineral Liat Silikat adalah mineral sekunder yang masih mengandung Si yang dihasilkan dari pengendapan kombinasi beberapa komponen kimia hasil pelapukan mineral primer.

Mineral Liat Tipe 1:1 adalah mineral liat silikat yang satuan kristalnya tersusun dari 1 lembar Al-Oktahedral dan 1 lembar Si-Tetrahedral. Misal, Kaolinit.

Mineral Liat Tipe 2:1 adalah mineral liat silikat yang satuan kristalnya tersusun dari 1 lembar Al-Oktahedral dan 2 lembar Si-Tetrahedral.

Mineral Primer adalah mineral yang masih asli seperti saat awal terbentuk, belum mengalami proses pelapukan.

Mineral Sekunder adalah mineral yang merupakan hasil rekombinasi berbagai species kimia yang dihasilkan selama proses pelapukan mineral primer.

Mollisols adalah salah satu order dalam Taksonomi Tanah yang merupakan tanah padang rumput, merupakan salah satu lahan yang paling produktif, dicirikan oleh hadirnya Epipedon Molik.

Muatan Negatif Tanah adalah muatan koloid tanah yang muncul dari bahan mineral dan/atau bahan organik yang dapat berinteraksi dengan ion bermuatan positif atau kation.

Muatan Permanen adalah muatan negatif tanah yang besarnya tidak tergantung pada perubahan pH tanah. (lihat **Muatan Tidak Tergantung pH**)

Muatan Positif Tanah adalah muatan koloid tanah yang muncul dari bahan mineral dan/atau bahan organik tanah yang dapat berinteraksi dengan ion bermuatan negatif atau anion.

Muatan Tergantung pH adalah muatan negatif atau muatan positif tanah yang besarnya berubah kuantitas dengan perubahan pH tanah.

Muatan Tidak Tergantung pH adalah muatan negatif atau muatan positif tanah yang besarnya tidak terpengaruh pada perubahan pH tanah. (Lihat **Muatan Permanen**).

Muck adalah Histosols yang telah terdekomposisi dengan baik.

Mulsa adalah bahan organik atau sintetik penutup tanah yang berfungsi untuk mengurangi penguapan air.

Nekrosis adalah matinya jaringan tanaman sehingga warnanya menjadi coklat karena defisiensi unsur hara tertentu.

Nematoda adalah binatang non-arthropoda yang tidak memiliki segmentasi, tidak berwarna, banyak terdapat di dalam tanah. Umumnya binatang ini berukuran kecil dan hidup saprofit (hidup dari sisa tanaman yang telah mati) dan sebagian di antaranya juga parasitik dan hidup di akar tanaman sehingga dapat merugikan tanaman.

Nisbah C/N adalah nilai C-Organik dibagi dengan nilai N-Total tanah, menunjukkan tingkat dekomposisi bahan organik tanah.

Nitrifikasi adalah proses perubahan ion NH_4^+ menjadi NO_2^- kemudian menjadi NO_3^- .

Oksidasi adalah proses kimia unsur tertentu melepaskan elektron sehingga bilangan oksidasinya meningkat dan menyebabkan senyawa lain bereduksi.

Olah Tanah adalah cara mekanik untuk menurunkan kerapatan isi tanah sehingga porositas tanah meningkat untuk pengudaraan dan pengairan tanah.

Olah Tanah Intensif adalah olah tanah dengan intensitas tinggi dengan satu atau beberapa teknik mekanik.

Olah Tanah Konvensional adalah olah tanah yang dilakukan berdasarkan kebiasaan yang berlaku umum, biasanya merupakan olah tanah intensif.

Order adalah tingkat klasifikasi tertinggi dalam Taksonomi Tanah. Misalnya, Mollisols, Alfisols, dan Gelisols.

Oxisols adalah sebuah order dalam Taksonomi Tanah yang merupakan tanah yang mengandung banyak oksida, tanah yang sangat lapuk.

Padatan Tanah adalah salah satu fase tanah dengan komposisi tertinggi, mencakup sampai dengan 50% dari volume tanah.

Pasir adalah salah satu fraksi tanah yang memiliki ukuran butir 0.005 – 2 mm.

Patogen adalah mikroorganisme tanah yang dapat berpengaruh buruk terhadap tanaman.

Peat adalah Histosols yang masih kurang terdekomposisi.

Pedon adalah satuan terkecil tanah yang darinya dapat diperoleh informasi seluruh sifat tanah baik sifat fisika, kimia, dan biologi.

Pelapukan adalah proses penghancuran fisika, kimia, dan/atau biologi mineral tanah yang menghasilkan komponen-komponen yang lebih sederhana.

Pelapukan Biologis adalah pelapukan mineral tanah yang diakibatkan oleh senyawa biokimia yang dikeluarkan oleh akar tanaman.

Pelapukan Fisika adalah proses pelapukan mineral tanah yang diakibatkan oleh tenaga mekanik. Misalnya, pemecahan batuan akibat perkembangan akar tanaman.

Pelapukan Kimia adalah pelapukan secara kimia yang diakibatkan oleh senyawa-senyawa kimia yang terdapat atau berkembang di dalam tanah.

Pemadatan Tanah adalah proses peningkatan kerapatan isi tanah yang terjadi karena kerja tenaga mekanik.

Pembenah Tanah (*Soil Conditioner*) adalah bahan yang dapat secara langsung atau tidak langsung memperbaiki sifat fisika, kimia, dan/atau biologi tanah.

Pemupukan adalah introduksi unsur hara dari luar sistem tanah untuk meningkatkan ketersediaan unsur hara tanah bagi tanaman.

Pencemaran Tanah adalah masuknya bahan asing ke dalam tanah yang dapat merusak sifat kimia, fisika, dan/atau biologi tanah.

Pencucian adalah proses fisika terbawanya ion atau senyawa kimia atau partikel tanah oleh air perkolasi.

Pengapuran adalah penambahan bahan kapur yang bertujuan meningkatkan pH tanah agar kondisi tanah lebih cocok secara fisika, kimia, dan/atau biologis bagi tanaman.

Abdul Kadir Salam – 2020

Pengasaman adalah penambahan bahan asam yang dapat menurunkan pH tanah agar kondisinya lebih cocok secara fisika, kimia, dan biologis bagi tanaman..

Pengendapan adalah proses pengikatan unsur oleh agen kimia sehingga unsur dan agen kimia tersebut menyatu dalam bentuk endapan kimia bila konsentrasinya mencapai titik jenuh. (lihat **Presipitasi**).

Penjerapan adalah proses pengikatan suatu unsur di permukaan aktif yang berlawanan muatan sehingga unsur tersebut tidak mobil. (Lihat **Adsorpsi**).

Penjerapan Spesifik adalah pengikatan sebuah spesies kimia ke dalam padatan mineral dengan menggantikan posisi unsur tertentu dalam struktur padatan mineral. (Lihat **Adsorpsi Spesifik**).

Perkolasi adalah pergerakan air di dalam pori tanah yang saling berhubungan yang membentuk saluran pori.

Pertukaran Anion adalah proses pergantian anion yang terjerap di permukaan koloid positif dengan anion bebas yang berada di dalam larutan tanah.

Pertukaran Ion adalah proses pertukaran ion yang terjerap di permukaan padatan tanah dengan ion lain dengan muatan berlawanan yang larut di dalam larutan tanah.

Pertukaran Kation adalah proses pergantian kation yang terjerap di permukaan koloid negatif tanah dengan kation yang berada di dalam larutan tanah.

Pertukaran Ligand adalah pertukaran ion secara langsung antara ion yang terikat di permukaan koloid tanah dengan ion yang terikat di permukaan akar tanaman.

Pestisida adalah bahan kimia yang digunakan untuk membasmi atau mengendalikan hama penyakit dan gulma tanaman.

Petroferik (*Iron Pan*) adalah plintit yang mengeras setelah melalui pembasahan dan pengeringan.

pH Optimum adalah suatu nilai pH pada saat aktivitas enzim fosfatase di dalam tanah maksimum.

Plintit adalah akumulasi besi yang mengkristal di daerah yang mengandung banyak besi di wilayah hangat dan basah.

Point of Zero Charge (PZC) adalah suatu nilai pH pada saat KTK atau KTA tanah = 0.

Pori Tanah adalah ruang kosong yang terletak di antara partikel tanah atau di antara agregat tanah.

Abdul Kadir Salam – 2020

Pori Interagregat adalah pori tanah yang terdapat di antara agregat-agregat tanah.

Pori Intraagregat adalah pori tanah yang terdapat di antara partikel tanah di dalam suatu agregat.

Porositas Tanah adalah jumlah keseluruhan ruang pori di dalam tanah.

Presipitasi adalah proses pengikatan unsur oleh agen kimia sehingga unsur dan agen kimia tersebut menyatu dalam bentuk endapan kimia bila konsentrasinya mencapai titik jenuh. (Lihat **Pengendapan**)

Produser adalah makhluk hidup dalam siklus unsur hara yang dapat menghasilkan karbohidrat dan turunannya yaitu tanaman.

Profil Tanah adalah penampang melintang dari tubuh tanah yang menggambarkan horizonisasi tanah.

Prokariot adalah mikroorganisme yang tidak jelas termasuk flora atau fauna, mencakup bakteri, aktinomisetes, dan ganggang hijau biru.

Proton adalah ion H^+ atau H_3O^+ (hidronium).

Protozoa adalah binatang bersel satu yang banyak terdapat di tanah yang basah dan berhumus, hidup di sekitar partikel tanah, berperan dalam mendekomposisi bahan organik tanah.

Pupuk adalah bahan kimia anorganik atau organik yang mengandung unsur hara yang dapat meningkatkan ketersediaan unsur hara bila ditambahkan ke dalam tanah.

Pupuk Biologis adalah pupuk yang mengandung mikroorganisme yang di dalam tanah berperan aktif meningkatkan ketersediaan unsur hara dari sumber-sumber alami seperti bahan organik tanah dan mineral tanah.

Pupuk Buatan adalah pupuk kimia anorganik yang diproduksi oleh industri.

Pupuk Hijau adalah pupuk kimia organik yang diproduksi dengan bahan baku dari sisa-sisa tanaman.

Pupuk Kandang adalah pupuk kimia organik yang diproduksi dengan bahan baku dari sisa-sisa atau kotoran hewan.

Pupuk Kimia adalah pupuk kimia anorganik yang dihasilkan oleh industri. (Lihat **Pupuk Buatan**).

Pupuk Majemuk adalah pupuk kimia yang mengandung lebih dari satu unsur hara.

Pupuk Organik adalah pupuk kimia organik yang diproduksi dengan bahan dasar sisa-sisa tanaman atau kotoran hewan dan manusia.

Pupuk Tunggal adalah pupuk kimia yang mengandung hanya satu jenis unsur hara.

Reaksi Tanah (pH) adalah indikator tingkat konsentrasi ion H^+ di dalam tanah dengan nilai antara 0 – 14, yang dapat menunjukkan tingkat kesuburan tanah.

Reduksi adalah proses kimia penerimaan elektron oleh spesies kimia tertentu sehingga mengalami penurunan bilangan oksidasi.

Redoks adalah kombinasi proses oksidasi dan reduksi yang di dalamnya sebuah spesies kimia mengeluarkan elektron sehingga mengalami peningkatan bilangan oksidasi dan satu spesies kimia lainnya menerima elektron sehingga mengalami penurunan bilangan oksidasi.

Respirasi adalah proses oksidasi atom karbon di dalam hidrokarbon dengan O_2 sebagai penerima elektron dan mengalami reduksi.

Rodentisida adalah bahan kimia yang digunakan untuk membasmi and mengendalikan hama tikus.

Regolith adalah bagian batuan yang telah mengalami penghancuran.

Rhizobium adalah bakteri yang dapat bersimbiosis dengan akar tanaman legume dan dapat memfiksasi N_2 dari udara.

Rizosfir adalah wilayah di sekitar perakaran tanaman yang memiliki sifat-sifat khas di antaranya tingginya kandungan CO_2 dan aktivitas enzim tanah.

Ruang Antar Lapisan (RAL) adalah ruang nano yang berada di antara lapisan mineral liat silikat.

Segitiga Tekstur adalah bangunan segitiga yang masing-masing sisinya menunjukkan persentase liat, debu, dan pasir yang dapat digunakan untuk menentukan kelas tekstur tanah.

Seri adalah tingkat terendah dalam Taksonomi Tanah yang menggambarkan sifat tanah secara rinci.

Sesquioksida adalah mineral liat nir-silikat yang mencakup oksida dan hidroksioksida.

Si-Tetrahedral adalah bangunan dasar mineral liat silikat yang terdiri dari 1 atom Si dan 4 atom Oksigen yang membentuk 4 bidang.

Solum Tanah adalah Horizon A dan Horizon B tanah.

Spodosols adalah salah satu order dalam Taksonomi Tanah yang merupakan tanah hutan pinus yang berpasir dan asam.

Strip Cropping adalah penanaman dalam bentuk barisan untuk mengurangi kecepatan erosi tanah.

Struktur Tanah adalah kombinasi pasir dan debu tanah sebagai kerangka dan liat dan bahan organik sebagai pengikat sehingga membuat bangunan tiga dimensi dengan ruang-ruang pori di dalamnya.

Suborder adalah tingkatan klasifikasi tanah di dalam Taksonomi Tanah di bawah Order.

Subsoil adalah lapisan bawah tanah atau Horizon B.

Substitusi Isomorfik adalah pergantian ion inti dalam bangunan dasar mineral liat Si-Tetrahedral atau Al-Oktahedral yang menghasilkan muatan negatif di dalam tanah.

Survey Tanah adalah pengamatan terstruktur tanah di lapang dan analisis di laboratorium untuk memperoleh data-data tanah di lapang serta pengolahan data dan interpretasinya untuk memperoleh kesimpulan dan rekomendasi yang akurat tentang tanah.

Takaran Maksimum adalah tingkatan unsur hara yang dapat diberikan ke dalam tanah dan menghasilkan produksi maksimum untuk tanaman tertentu.

Takaran Optimum adalah tingkatan unsur hara yang dapat diberikan ke dalam tanah dan menghasilkan produksi dengan keuntungan ekonomi maksimum untuk tanaman tertentu.

Tanah Alkalin adalah tanah yang memiliki pH tinggi di atas 7.0.

Tanah Asam adalah tanah yang memiliki pH rendah di bawah pH 7.0.

Tanah Gambut adalah tanah yang mengandung bahan organik dalam jumlah tinggi yang berkembang karena tergenang oleh air laut, terdiri dari Gambut Pedalaman (*Inland Peat*), Gambut Transisi (*Transitional Peat*), dan Gambut Pasang Surut (*Coastal Peat*).

Tanah Miskin adalah tanah yang sudah tidak mampu menyediakan unsur hara dalam jumlah cukup untuk pertumbuhan dan perkembangan tanaman.

Tanah Muda tanah yang masih mengandung mineral muda dalam jumlah cukup signifikan sehingga dapat menyumbangkan unsur hara dalam jumlah signifikan.

Tanah Salin (*White Alkali*) adalah tanah dengan garam terlarut dalam jumlah yang berpengaruh buruk terhadap tanaman.

Tanah Sodik (*Black Alkali*) adalah tanah yang dicirikan oleh kandungan Na yang cukup tinggi

Tanah Subur adalah tanah yang masih mampu menyediakan unsur hara dalam jumlah cukup untuk pertumbuhan tanaman.

Tanah Sulfat Masam adalah tanah yang mengandung pirit (FeS_2) yang umumnya memiliki pH yang sangat rendah akibat oksidasi pirit. (Lihat *Cat Clay*).

Tanah Tua adalah tanah yang sudah tidak subur karena tidak memiliki mineral muda dalam jumlah signifikan sehingga tidak memiliki cukup unsur hara yang disumbangkan.

Tanpa Olah Tanah adalah teknik pengolahan tanah dengan tidak mengolah tanah dan mengembalikan bahan organik asal lahan untuk memelihara bahan organik tanah dan meningkatkan kesuburan tanah.

Taksonomi Tanah adalah tata cara pengelompokan dan penamaan tanah sesuai dengan sifat morfologi, fisika, kimia, dan biologi tanah.

Teknik Larikan (*Side Dressing*) adalah teknik penerapan pupuk ke dalam tanah dengan cara memasukkannya ke dalam tanah sampai kedalaman tertentu di samping barisan tanaman.

Teknik Tebar (*Broadcasting*) adalah teknik penerapan pupuk ke dalam tanah dengan cara menebarkan pupuk merata di permukaan tanah sampai kedalaman tertentu dengan pengadukan atau pengolahan tanah.

Teknik Tugal (*Injection*) adalah teknik penerapan pupuk ke dalam tanah dengan memasukkan pupuk sampai kedalaman tertentu di samping tanaman dengan cara injeksi.

Tekstur Tanah adalah komposisi fraksi pasir, fraksi debu, dan fraksi liat tanah.

Terasing adalah cara mengatasi erosi tanah pada lahan bergelombang atau berbukit dengan membangun teras-teras berdasarkan kontur lahan.

Titrasi adalah proses netralisasi bertahap keasaman (tanah) dengan suatu basa, misalnya keasaman tanah dengan penambahan kapur secara bertahap sehingga pHnya meningkat.

Topsoil adalah lapisan atas tanah yang umumnya adalah Horizon A, mungkin termasuk Horizon O.

Transpirasi adalah proses penguapan air melalui permukaan daun tanaman.

Udara Tanah adalah gas yang mengisi pori tanah yang tidak ditempati oleh air tanah.

Uji Level adalah salah satu teknik analisis untuk mengetahui status unsur hara tanah dengan menggunakan indikator tanaman pada lahan dengan perlakuan unsur hara dengan takaran bertingkat

Abdul Kadir Salam – 2020

Uji Minus adalah salah satu teknik analisis untuk mengetahui status unsur hara tanah dengan menggunakan indikator tanaman pada lahan dengan perlakuan kombinasi unsur hara tanpa unsur hara uji.

Uji Plus adalah salah satu teknik analisis untuk mengetahui status unsur hara tanah dengan menggunakan indikator tanaman pada lahan dengan kombinasi perlakuan unsur hara uji.

Uji Tanah adalah teknik analisis tanah dengan mengukur kandungan unsur hara tanah secara langsung.

Uji Tanaman adalah salah satu teknik analisis tanah untuk mengetahui tingkat kandungan unsur hara tanah secara tidak langsung dengan mengukur tanggapan tanaman terhadap kandungan hara di dalam tanah.

Ultisols adalah salah satu order tanah dalam Taksonomi Tanah yang merupakan tanah yang berkembang di wilayah tropika dengan Kejenuhan Basa rendah < 35%

Unsur Hara adalah unsur yang diperlukan oleh tanaman untuk melengkapi pertumbuhan dan perkembangannya.

Unsur Hara Esensial adalah unsur yang diperlukan oleh tanaman karena dalam tanaman memiliki fungsi yang tidak dapat digantikan oleh unsur lain.

Unsur Hara Makro adalah unsur hara esensial yang diperlukan oleh tanaman dalam jumlah banyak.

Unsur Hara Makro Pelengkap adalah unsur hara esensial yang diperlukan oleh tanaman dalam jumlah banyak. Yang termasuk Unsur Hara Makro Pelengkap adalah N, P, K, S, Ca, Mg, dan K.

Unsur Hara Makro Utama adalah unsur hara esensial yang diperlukan oleh tanaman dalam jumlah banyak. Yang termasuk Unsur Hara Makro Utama adalah C, H, dan O..

Unsur Hara Mikro adalah unsur hara esensial yang diperlukan oleh tanaman namun dalam jumlah sedikit.

Unsur Hara Mikro Kelompok Logam adalah unsur hara mikro yang termasuk kelompok logam, di antaranya adalah Fe, Mn, Zn, Cu, dan Mo.

Unsur Hara Mikro Kelompok Nir-Logam adalah unsur hara mikro yang tidak termasuk kelompok logam, di antaranya adalah Si, B, dan Cl.

USLE adalah singkatan dari *Universal Soil-Loss Equation* yang secara matematika dapat ditulis sebagai berikut $A = RKLSCP$ dengan A adalah rata-rata massa tanah yang hilang akibat erosi di suatu lokasi tertentu dalam jangka panjang, R adalah faktor rata-rata curah hujan dan limpasan permukaan jangka panjang, K adalah indeks erodibilitas, L adalah faktor panjang

lereng, S adalah faktor sudut kelerengan, C adalah faktor penutup tanah, dan P adalah faktor praktik kontrol erosi.

Vertisols adalah salah satu order tanah dalam Taksonomi Tanah yang merupakan tanah yang mengandung liat hitam yang mudah retak karena memiliki sifat mengembang dan mengerut dengan berubahnya kadar air tanah karena kandungan mineral liat tipe 2:1 seperti montmorilonit.

Volatilisasi adalah proses kimia yang mengubah N tanah menjadi N_2 sehingga N tanah hilang melalui penguapan.

Warna Tanah adalah salah satu sifat fisika tanah yang dapat ditentukan dengan menggunakan *Munsell Soil Color Chart* menyangkut tiga sifat tanah yaitu: *Hue*, *Value*, dan *Chroma*.

INDEKS SUBYEK

A

Analisis Tanah

Analisis Tanah · 251
 Analisis Tanaman · 251
Anodic Stripping Voltametry · 253
 Contoh Tanah · 258
 Contoh Tanah Komposit · 260
 Cukup Hara · 270
 Defisiensi Hara · 270
 Deteksi Gejala Defisiensi · 251
Ion Exchange Chromatography · 253
Ion Exchange Resin · 254
Ion Selective Electrode · 253
 K Dapat Dipertukarkan · 310
 Kekurangan Hara · 234
 Kekurangan Kalium · 234
 Kekurangan Klor · 235
 Kelebihan Hara · 233
 Kelebihan Kalium · 234
 Ketersediaan Kalium · 240
 Ketersediaan Unsur Hara · 240, 242
 Klorosis · 234, 251
 Konsentrasi Kritis · 251
 Konsumsi Mewah · 234

Mewah Hara · 270
 Nekrosis · 251
 Neraca Hara · 32, 318
 Penetapan Kebutuhan · 150
 Pengekstrak Unsur Hara · 258
 Takaran Maksimum · 271
 Takaran Optimum · 271
 Toksisitas Hara · 270
 Uji Biologis · 251
 Uji Korelasi · 255
 Uji Level · 260
 Uji Minus · 260
 Uji Plus · 260
 Unsur Hara Dapat Dipertukarkan · 254
 Unsur Hara Terlarut · 252

B

Bahan Induk Tanah

Abu Vulkanik · 36
 Bahan Induk Tanah · 17, 38, 55
 Batuan Basaltik · 36, 56, 249
 Batuan Beku · 249
 Batuan Fosfat · 268, 302
 Batuan Gabro · 36, 56

Abdul Kadir Salam – 2020

Batuan Gamping · 36, 58
 Batuan Granit · 36, 249
 Batuan Kapur · 249
 Batuan Kristalin · 36, 56
 Batuan Lempeng · 36, 58, 249
 Batuan Pasir · 36, 58, 249
 Batuan Sedimenter · 57, 249
 Feromagnesia · 36, 39
 Padatan Mineral · 4, 20
 Padatan Organik · 4
 Padatan Tanah · 2
 Regolith · 56

Bahan Organik

Asam Fulvik · 134
 Asam Humik · 134
 Bahan Humik · 133
 Bahan Nir-Humik · 133
 Biosolid · 272
 C-Organik · 19, 132, 188, 191, 311
 Humat · 75
 Humin · 134
 Humus · 63, 80, 95, 104, 124, 131
 Kompos · 100
 Lignin · 133, 209
 Polipeptida · 133
 Polisakarida · 133
 Selulosa · 209

Biologi Tanah

ADP · 234
 Akar Tanaman · 184, 189, 317
 Aktinomisetes · 26, 179
 Alga · 300
 AMP · 234
 ATP · 234
Azotobacter · 185
 Bakteri · 26, 76, 137, 178, 308
 Bakteri *Nitrobakter* · 187
 Bakteri *Nitrosomonas* · 187
 Bayam · 64, 306
 Cacing Tanah · 4, 26, 173, 182, 188, 291
Contour-Cropping · 287

Abdul Kadir Salam – 2020

Daerah Perakaran · 64, 175, 184
 Dekomposer · 4, 176, 315
Desulfovibrio spp · 49
 Eukariot · 178
 Fitoplankton · 300
 Fotosintesis · 93
 Ganggang Hijau · 179, 233
 Ganggang Hijau Biru · 26, 179
 Hewan Tanah · 290
 Hutan Primer · 144, 191
 Hutan Sekunder · 144, 191
 Intersepsi Akar · 9, 115
 Jagung · 306
 Jamur · 26, 76, 137, 179, 300, 308
 Jaring Makanan · 295
 Kedelai · 24, 69
 Konsumer · 176
 Legume · 182
 Lichen · 180
 Makroorganisme Tanah · 5, 26, 182
 Marmut · 184, 291
 Mikoriza · 179
 Mikroorganisme Tanah · 5, 137, 177, 189, 273, 292, 301, 317
 Nematoda · 182
 Organisme · 56
Paspalum conjugatum · 191
 Penyerapan Hara · 4, 9, 10, 248
 Plankton · 296
 Produser · 176
 Prokariot · 26, 178
 Protozoa · 26, 180
 Respirasi · 7
 Rhizobium · 182, 185, 233
 Rizosfir · 24, 175
 Rotasi Tanaman · 133
 Rumput Teki · 64
 Semut · 183, 291
Strip-Cropping · 287
 Tikus · 184, 291
 Vegetasi · 189

D**Degradasi Tanah**

Alachlor · 311
 Bioakumulator · 309
 Fitoekstraksi · 309
 Fitoremediasi · 309
 Fungisida · 301, 310
 Herbisida · 310
 Herbisida 2,4-D · 311
 Herbisida Ametrin · 311
 Herbisida Diuron · 311
 Herbisida Paraquat · 311
 Herbisida Pascatumbuh · 311
 Herbisida Pratumtumbuh · 311
 Hiperakumulator · 309
 Insektisida · 310
 Limbah Industri · 258, 293
 Limbah Industri Tapioka · 293
 Logam Berat · 294, 315
 Metalofit · 309
 Metolachlor · 311
 Penyakit *Itai-itai* · 299
 Penyakit Minamata · 299
 Penyakit Wilson · 299
 Pestisida · 310
 Sampah Kota · 288
 Sampah Organik · 315
 Teknik *Bioassay* · 311

F**Fisika Tanah**

Aerasi Tanah · 5
 Agregat Makro · 183
 Agregat Mikro · 183
 Air Bawah Tanah · 105, 107, 279, 310
 Air Gravitasi · 23, 107
 Air Tanah · 2, 107
 Air Tersedia · 23, 109

Aliran Massa · 9, 60, 112, 249
 Biopori · 292
 Cara Mekanik · 287
 Curah Hujan · 61, 283
 Debu · 5, 21, 38, 79, 124, 283
 Difusi · 9, 60, 112, 249
 Difusivitas · 115
 Distribusi Ukuran Pori · 88
 Drainase · 116
 Erosi · 30, 68, 100, 105, 279
 Erosi Alur · 281
 Erosi Angin · 281, 287, 292
 Erosi Gravitasi · 282
 Erosi Lembar · 281
 Erosi Parit · 281
 Erosi Rayapan Permukaan · 282
 Erosi Salto · 282
 Evaporasi · 107
 Evapotranspirasi · 111
 Gaya Adesi · 109
 Gaya Kohesi · 109
Ground Water · 279
 Infiltrasi · 30, 105, 279
 Intensitas Sinar Matahari · 61
 Kadar Air Tanah · 6, 59, 92, 180, 183, 188, 192
 Kapasitas Lapang · 23, 109, 116
 Kecepatan Erosi · 283
 Kecepatan Infiltrasi · 106
 Kekelokan · 85, 112, 115
 Kemiringan lahan · 279
 Kerapatan Isi · 68, 90, 288
 Kerapatan Partikel · 91, 292
 Komposisi Tanah · 20
 Konsistensi Tanah · 15, 93
 Kontrol Erosi · 285
 Konversi Tanah · 319
 Lempung · 150
 Liat · 5, 20, 38, 54, 80, 124, 150, 283
 Limpasan Permukaan · 30, 68, 105, 279
 Mulsa · 111, 176, 286

Olah Tanah · 102, 191, 287, 290
 Olah Tanah Intensif · 181, 191, 281
 Olah Tanah Konservasi · 103, 181
 Olah Tanah Konvensional · 103, 273
 Olah Tanah Minimum · 103, 191, 273, 287
 Padatan Mineral · 124
 Padatan Organik · 124
 Padatan Tanah · 124
 Panjang Lereng · 283
 Partikel Tanah · 79, 124
 Pasir · 5, 20, 38, 79, 124, 150, 283, 311
 Pemadatan Tanah · 30, 101, 288
 Pemantap Agregat · 288
 Pemecah Angin · 288
 Pencucian · 2, 9, 10, 30, 81, 106
 Penggenangan · 292
 Penutup Tanah · 285
 Perkolasi · 30, 105, 106, 279, 295
 Persamaan Ficks. · 115
 Pori Interagregat · 80, 85
 Pori Intraagregat · 80, 85
 Pori Makro · 182
 Pori Tanah · 22, 80, 85, 170, 279
 Porositas Tanah · 5, 9, 87
 Potensial Air · 9
 Radiasi Matahari · 10
 Relief · 62
 Rumah Kaca · 100
 Saluran Pori · 87, 112, 171
 Sedimen · 281
 Segitiga Tekstur · 82
 Stabilitas Agregat · 68
 Struktur Tanah · 5, 9, 17, 22, 84
 Sudut Lereng · 283
 Suspensi · 282
 Tanaman Penutup · 106
 Tanpa Olah Tanah · 103, 287
 Tekstur Tanah · 5, 9, 17, 22, 81, 150
 Temperatur Ideal · 96
 Temperatur Tanah · 10, 61, 96, 99, 180, 188, 193

Temperatur Udara · 100
 Terasering · 287
 Titik Layu Permanen · 23, 109
 Topografi · 62
 Transpirasi · 10, 107
 Ukuran Partikel · 49
 USLE · 283
 Vegetasi Penutup · 286
 Warna Tanah · 16, 94

G

Genesis Tanah

Alih Fungsi Lahan · 65
 Dekomposisi · 3
 Duripan · 202
 Epipedon · 198
 Epipedon Histik · 198
 Epipedon Molik · 198, 206
 Epipedon Okrik · 198, 203
 Epipedon Umbrik · 198
 Faktor Pembentuk Tanah · 28, 55, 196
 Fragipan · 202
 Gilgai · 206
 Horizon A · 17, 53, 191
 Horizon Albik · 202, 206
 Horizon Argilik · 200, 207
 Horizon B · 17, 54
 Horizon C · 17, 54
 Horizon E · 17, 53
 Horizon I · 17
 Horizon Kalsik · 202
 Horizon Kambik · 200, 203
 Horizon Kandik · 201
 Horizon Natrik · 201
 Horizon O · 17, 94, 191
 Horizon Oksik · 202
 Horizon Penciri · 197
 Horizon Permukaan · 198
 Horizon Petrokalsik · 202
 Horizon R · 17, 54

Horizon Spodik · 201
 Horizon Sub-Permukaan · 198
 Horizonisasi · 17
 Iklim · 56, 59
 Iron Pan · 202
 Kecepatan Pelapukan · 41
 Pedon · 16
 Pelapukan · 3, 69, 122, 246, 317
 Pelapukan Biologis · 50
 Pelapukan Fisika · 42
 Pelapukan Kimia · 43
 Pelapukan Mineral · 39
 Petroferik · 202
 Plintit · 202
 Profil Tanah · 17
 Relief · 56
 Topografi · 56

K

Kimia Tanah · 275

Adsorpsi · 122, 161
 Akseptor Elektron · 47
 Aluminium · 4, 118, 141, 146
 Amoniak · 53, 190
 Amonifikasi · 187, 233
 Amonium · 10, 141, 185, 233
 Amonium Molibdat · 268
 Amonium Nitrat · 268
 Amonium Sulfat · 268
 Anion Dapat Dipertukarkan · 167
 Arilsulfatase · 25, 184, 190, 247, 273
 Arsen · 309
 Asam · 145
 Asam Borat · 268
 Asam Fenolat · 208
 Asam Formik · 145
 Asam Fulvik · 50
 Asam Galik · 50
 Asam Humik · 50
 Asam Kafeik · 50
 Asam Karboksilat · 209
 Asam Oksalik · 45
 Asam Organik · 45, 317
 Asam *p*-Hidroksibenzoik · 50
 Asam Protokatekuik · 50
 Asam Salisilik · 50
 Asam Sitrik · 45
 Asam Vanilik · 50
 Atrazin · 103, 279
 Basa · 145
 Belerang · 153, 235
 Bentuk Unsur Hara · 235
 Besi · 66, 118, 273, 300, 310
 Biokatalisator · 4, 188
 Boraks · 268
 Boron · 235
 Daur Karbon · 176
 Daur Nitrogen · 185
 Daur Unsur Hara · 315
 Defisiensi Hara · 158
 Dehidrogenase · 273
 Dekompleksasi · 122, 238, 245
 Dekomposisi · 122, 174, 240, 246, 292
 Deret Liotropi · 159, 245
 Desorpsi · 3, 122, 161, 245
 DTPA · 258
 EDTA · 258
 Elektron · 45
 Enzim Tanah · 4, 25, 171, 188, 240, 293, 300
 Fero Sulfat · 268
 Fiksasi N · 233
 Fosfatase · 6, 68, 137, 145, 184, 190, 247, 273
 Fosfatase Alkalin · 64, 184, 190, 275, 303
 Fosfatase Asam · 64, 104, 176, 184, 190, 303
 Fosfor · 9, 103, 176, 189, 247, 269, 274, 279, 310
 Fungsi Fosfor · 234
 Fungsi Kalium · 234

Abdul Kadir Salam – 2020

- Fungsi Kalsium · 234
Fungsi Magnesium · 235
Fungsi Molibdenum · 235
Fungsi Nitrogen · 233
Fungsi Unsur Hara · 233
Fungsi Unsur Hara Mikro Logam · 235
Gypsum · 268
Gugus Fungsional · 71, 73, 134
Hara Alami · 230
Hasil Kali Kelarutan · 245
Hidrasi · 61
Hidrogen · 4
Hidrolisis · 6, 25, 46, 70, 190
Hujan Asam · 70
Hukum Coulomb · 162
Ikatan Hidrogen · 126
Inhibitor Urease · 53, 190
Ion Bebas · 49, 236, 244, 248
Ion Bebas Kadmium · 294
Ion Bebas Tembaga · 294
Ion Kompleks · 49, 238
Kadmium · 279, 299, 300, 303, 308, 309
Kalium · 9, 38, 45, 50, 176, 256, 269, 274
Kalium Klorida · 268
Kalium Sulfat · 268
Kalium Terfiksasi · 257
Kalsit · 268
Kalsium · 141, 307, 317
Kalsium Klorida · 258
Kalsium Nitrat · 268
Kapasitas Sangga · 146
Kapasitas Tukar Kation · 70, 74, 136, 159, 163, 307
Karbon · 4, 172, 180, 247
Karbonasi · 45
Karbon dioksida · 70, 141, 171, 317
Kation Asam · 164
Kation Basa · 164
Kation Dapat Dipertukarkan · 159, 237
Keasaman (pH) Tanah · 69
Keasaman Aktif · 150
Keasaman Potensial · 150
Kebutuhan Kapur · 151
Kejenuhan Aluminium · 164
Kejenuhan Basa · 164, 207, 307
Kelat · 50
Kelat Besi · 268
Kelat Mangan · 268
Kelat Seng · 268
Kelat Tembaga · 268
Kobal · 233, 298, 300
Koloid Negatif · 10
Koloid Organik · 125
Kompleksasi · 122, 238, 245
Kompos · 267
Konstanta Keseimbangan · 44, 245
Krom · 297, 300, 304
Larutan Penyangga · 144
Ligan · 152
Luas Permukaan Aktif · 75
Magnesium · 141
Mangan · 310
Mangan Oksida · 268
Mangan Sulfat · 268
Merkuri · 297, 299
Mobilitas Unsur Hara · 9
Molibdenum · 143, 233, 273
Muatan Negatif · 70, 73, 128, 155
Muatan Positif · 131, 135, 157, 166
Muatan Tergantung pH · 164
Muatan Tidak Tergantung pH · 163
Natrium · 233, 279
Natrium Molibdat · 268
Natrium Pentaborat · 268
Nikel · 297, 300
Nisbah C/N · 5, 174
Nitrat · 10, 103, 185, 187, 190, 233
Nitrifikasi · 187
Nitrogen · 9, 176, 181, 267, 274, 279
N-Total · 19, 191
Oksidasi · 45, 118, 308
Oksigen · 4, 47, 141, 171, 193, 247

- Ortofosfat · 6, 25, 190
 Pelarutan · 122, 238, 245
 Pembasaan · 24
 Pembena Tanah · 271
 Pemupukan · 3, 262
 Pencucian · 248
 Pengapuran · 24, 149, 271, 305
 Pengaratan Besi · 61
 Pengasaman · 24, 153, 272
 Pengendapan · 3, 118, 238, 245, 248, 309, 315
 Penghambat Nitrifikasi · 187
 Penjerapan · 9, 315
 Penjerapan Kation · 309
 Penjerapan Spesifik · 167
 Pergerakan Hara · 248, 303, 307, 308
 Pertukaran Anion · 24, 157, 167
 Pertukaran Ion · 24
 Pertukaran Kation · 23, 159
 Pertukaran Kontak · 47
 pH Optimum · 144
Point of Zero Charge · 157
 Preferensi · 308
 Proton · 46
 P-Tersedia · 19
 Pupuk · 4, 262
 Pupuk Biologis · 181, 267
 Pupuk Buatan · 267
 Pupuk Hijau · 272, 275
 Pupuk Kandang · 275
 Pupuk Kimia · 267, 275
 Pupuk Majemuk · 267
 Pupuk Organik · 267, 275
 Pupuk Tunggul · 267
 Reaksi Keseimbangan · 3
 Reaksi Kimia · 269
 Reaksi Tanah · 7, 64, 136, 143, 180, 188, 275, 294, 310, 317
 Reaktivitas Tanah · 155
 Redoks · 5, 25, 47, 118, 247
 Reduksi · 49, 118
 Selektivitas Kation · 159
 Seng · 66, 273, 297, 308, 309, 310
 Seng Sulfat Monohidrat · 268
 Seng Sulfida · 268
 Silikon · 4, 233
 SP 36 · 302
 Substitusi Isomorfik · 71, 72, 128, 155
 Sulfat · 190
 Sulfur · 189, 247
 Sumber Hara · 233
 Sumber Hara Eksternal · 261
 Sumber Hara Internal · 230, 261
 Teknik Injeksi Larikan · 264
 Teknik Injeksi Tugal · 265
 Teknik Pemupukan Kalium · 265
 Teknik Tebar · 263
 Tembaga · 49, 66, 273, 297, 299, 308, 309, 310
 Tembaga Asetat · 268
 Timbal · 297, 300, 303, 309
 Translokasi Hara · 4
Triple Superphosphate · 268
 TSP · 302
 Unsur Hara Esensial · 230
 Unsur Hara Makro · 232
 Unsur Hara Makro Pelengkap · 232
 Unsur Hara Makro Utama · 232
 Unsur Hara Mikro · 158, 232, 269, 273
 Unsur Hara Mikro Logam · 158, 232, 258
 Unsur Hara Mikro Nir-Logam · 232
 Unsur Hara Utama · 232
 Urea · 52, 70, 141, 190, 268, 302
Urea Slow Release · 53
 Urease · 25, 104, 176, 190, 273
 Vanadium · 233
 Volatilisasi · 53
 β -Glukosidase · 273, 275
- Klasifikasi Tanah · 197**
 Alfisols · 18, 24, 69, 132, 207
 Andisols · 204, 303
 Aridisols · 205
 Entisols · 68, 203

Famili · 214
 Fase Tanah · 209
 Gambut Fibrik · 209
 Gambut Hemik · 209
 Gambut Pasang Surut · 209
 Gambut Pedalaman · 209
 Gambut Saprik · 209
 Gambut Transisi · 209
Great Group · 212
 Histosols · 208, 292
 Inceptisols · 203
 Mollisols · 7, 27, 132, 206
Muck · 132, 208
 Oxisols · 7, 27, 132, 135, 179, 208
Peat · 132, 150, 208
 Seri Tanah · 214
 Sistem Taksonomi Tanah · 202
 Spodosols · 206
Sub-Group · 213
 Suborder · 209
 Subsoil · 17, 308
 Tanah Alkalin · 148
 Tanah Aluvial · 58
 Tanah Asam · 148
 Tanah Matang · 76
 Tanah Miskin · 3
 Tanah Muda · 76, 246
 Tanah Organik · 150
 Tanah Salin · 154
 Tanah Sawah · 118, 191
 Tanah Sodik · 154
 Tanah Subur · 3, 27, 230
 Tanah Sulfat Masam · 49
 Tanah Tidak Subur · 230
 Tanah Tua · 76
 Tipe Tanah · 209
 Topsoil · 17, 308
 Ultisols · 68, 132, 183, 207
 Vertisols · 206

M
Mineral Tanah

Abu Vulkanik · 38, 58
 Albit · 6, 8, 39, 51
 Alofan · 38, 303
 Al-Oktahedral · 45, 127
 Amfibol · 38, 47
 Anortit · 51
 Apatit · 55, 151, 317
 Besi Oksida · 51
 Biotit · 45, 51
 Birnesit · 38
 Buhmit · 131
 Dolomit · 51, 149, 268, 302
 Epidot · 38
 Fayalit · 51
 Feldspar · 21, 38, 39, 46, 51, 240
 Ferihidrit · 38
 Feromagnesia · 56
 Fluorapatit · 51
 Forsterit · 51
 Galena · 51
 Gibsit · 37, 38, 51, 131
 Gypsum · 38
 Granit · 56
 Gutit · 38, 47, 131
 Haloisit · 125
 Hematit · 37, 38, 51, 131
 Hidroksiapatit · 51
 Illit · 39, 125, 130
 Imogilit · 38
 Kalkopirit · 49
 Kalsit · 38, 51, 144, 149
 Kaolinit · 21, 38, 39, 42, 45, 51, 126
 Klorit · 38, 125
 Korundum · 131
 Kuarsa · 38, 46, 51
 Lembar Alumina · 126
 Lembar Silika · 126
 Limonit · 131

Magnesit · 51
 Magnetit · 46, 51, 131
 Mangan Sulfida · 51
 Mika · 38, 39, 45
 Mineral Liat Nir-Silikat · 37, 124, 130
 Mineral Liat Silikat · 37, 124
 Mineral Primer · 35, 240
 Montmorilonit · 21, 39, 41, 51, 127
 Nontronit · 125
 Oksida Hidrat · 125
 Olivin · 38, 46, 47, 239
 Ortoklas · 51
 Pirit · 47, 51, 117, 118
 Pirofosfat · 157
 Piroksin · 38, 46, 47
 Ruang Antar Lapisan · 45, 126
 Rutil · 38
 Saponit · 125
 Sesquioksida · 22, 39, 125
 Si-Tetrahedral · 45, 126
 Smektit · 38, 71, 125
 Talk · 51
 Titanit · 46
 Titanium Oksida · 131

Turmalin · 38
 Vermikulit · 38, 71
 Zeolit · 271, 309
 Zirkon · 38, 46

S

Survey Tanah

Analisis Laboratorium · 223
 Kelas Kemampuan Lahan · 226
 Mobilisasi Lapang · 222
 Pelaksanaan · 222
 Pelaporan · 224
 Pengumpulan Data · 222
 Persiapan · 219
 Persiapan Akademik · 219
 Persiapan Logistik · 221
 Persiapan Teknis Analisis · 221
 Survey Awal · 221
 Survey Tanah · 218
 Tahapan Survey Tanah · 218
 Tim Survey Tanah · 218

RIWAYAT HIDUP PENULIS

Prof. Ir. Abdul Kadir Salam, M.Sc., Ph.D. dilahirkan di Bandung pada 01 November 1960. Ia menempuh pendidikan SD (lulus 1972), SMP (lulus 1976), dan SMA (lulus 1980) di Cirebon Jawa Barat. Pendidikan sarjana ditempuh di Institut Pertanian Bogor (lulus 1984) dalam bidang Ilmu Tanah. Pendidikan magister dan doktor masing-masing diselesaikan pada tahun 1989 dan 1993 di University of Wisconsin-Madison, Amerika Serikat, dalam bidang Kimia-Kesuburan Tanah dan Kimia Air. Ia juga pernah mengikuti *Postdoctoral Program* menekuni bidang Biokimia Tanah (Enzim Tanah) di *Nagoya University*, Jepang, pada 1995 – 1996.

Sebagai dosen sejak 1984 di Fakultas Pertanian Universitas Lampung ia mengajar berbagai mata kuliah untuk program sarjana dan pascasarjana: Dasar Ilmu Tanah, Kimia Tanah, Kesuburan Tanah, Pupuk dan Pemupukan, Analisis Tanah dan Tanaman, Metodologi Penelitian, Penulisan Ilmiah, serta Kimia dan Pencemaran Lingkungan. Sebagai peneliti, ia menggeluti berbagai masalah tanah, khususnya terkait dengan pengelolaan unsur hara dan nir-hara (logam berat) dan enzim tanah dengan dukungan pendanaan dari Universitas Lampung, Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan, *Japan Society for the Promotion of Science*, Indonesia



Abdul Kadir Salam – 2020

Toray Science Foundation, dan Kementerian Riset dan Teknologi. Ia telah menulis lebih dari 75 makalah ilmiah yang diterbitkan dalam jurnal nasional dan internasional. Ia juga pemateri dalam berbagai pelatihan Metodologi Penelitian dan Penulisan Ilmiah.

Selain menulis buku *Ilmu Tanah* ini (*Global Madani Press*, 2020, xvi+393 halaman), ia juga menulis buku *The Chemistry and Fertility of Soils under Tropical Weeds* (*Global Madani Press*, 2019, xii+190 halaman), buku *Managenement of Heavy Metals in Tropical Soil Environment* (*Global Madani Press*, 2017, xi+257 halaman), yang merupakan sintesis hasil-hasil penelitiannya selama hampir 30 tahun (1987–2017), buku *Enzymes in Tropical Soils* (*Global Madani Press*, 2014, xi+210 halaman), yang merupakan rangkuman hasil-hasil penelitiannya selama 17 tahun (1995-2012), dan *Ilmu Tanah Fundamental* (Edisi I, *Global Madani Press*, 2012, xii+362 halaman). Saat ini ia sedang menulis buku *Kimia Tanah* (*Global Madani Press*, 2020).

Dalam bidang manajemen, di Universitas Lampung ia pernah menjadi Kepala Laboratorium Kimia dan Kesuburan Tanah (1997-1999), Ketua Jurusan Ilmu Tanah (1998-2001), Staf Ahli Pembantu Rektor Bidang Akademik (2000-2004), Direktur *Sub-Project Management Unit Technological and Professional Skills Development Project TPSDP* (2001-2008), dan Direktur Program Pascasarjana (2006–2011). Ia juga pernah menjadi Direktur Eksekutif Perguruan Al-Kautsar Lampung (2002-2010), yang mengelola pendidikan pra-SD, dasar (SD dan SMP) dan menengah (SMA). Sejak 2010 ia menjabat sebagai Direktur Utama Yayasan Pendidikan Global Madani, yang mengelola pendidikan dasar (SD dan SMP) dan menengah (SMA) dengan kurikulum nasional yang diperkaya serta Perguruan Tinggi Al-Madani Bandar Lampung yang berdiri sejak tahun 2018.

Untuk banyak keperluan, peranan tanah sangat menentukan, dan sifat komponen serta interaksinya harus difahami dengan baik. Oleh karena itu, penguasaan ilmu tanah sangat penting bagi kalangan yang akan menggunakan tanah atau media lain yang berhubungan atau mirip dengan tanah, misalnya untuk keperluan pengelolaan lahan pertanian dan lingkungan.

ILMU TANAH menelaah tanah dari berbagai aspek dasar keilmuan tanah mencakup fisika tanah, kimia tanah, dan biologi tanah, serta genesis dan klasifikasi tanah. Selain itu, buku ini juga menelaah beberapa aspek praktis terkait dengan degradasi dan konservasi tanah, pengelolaan kesuburan tanah, dan survey tanah. Pembahasan juga mencakup berbagai komponen tanah, sifat-sifat, dan interaksinya dalam sistem tanah dalam pengelola berbagai substansi di dalam tanah, baik yang muncul secara alami di dalam tanah maupun yang masuk secara antropogenik ke dalam sistem tanah. Pembahasannya sebagian besar didukung dengan berbagai temuan hasil penelitian.

Buku ini penting bagi mahasiswa sarjana dan pascasarjana sebagai dasar untuk memahami dan mendalami ilmu tanah serta penggunaannya untuk pengelolaan lahan pertanian dan lingkungan. Buku ini juga penting bagi praktisi dalam memahami hal-hal fundamental dari sistem tanah.



Abdul Kadir Salam adalah Guru Besar Ilmu Tanah Fakultas Pertanian Universitas Lampung (2001); lulus program sarjana (1984) dari Institut Pertanian Bogor, program magister (1989) dan program doktor (1993) dari University of Wisconsin - Madison, Amerika Serikat, serta program posdoktoral (1995-1996) dari Nagoya University, Jepang.

FOTO KULIT : NANIK SRIYANI



globalmadani press
2020

jalan kavling raya no. 1, pramuka, rajabasa
bandar lampung, telf. (0721) 8011325

ISBN 978-602-19849-9-4



9 786021 984994