

TEKNOLOGI PENGELOLAAN

Spent Bleaching
Earth

Undang-undang Republik Indonesia Nomor 28 tahun 2014 tentang Hak Cipta Lingkup Hak Cipta

Pasal 1

Hak Cipta adalah hak eksklusif pencipta yang timbul secara otomatis berdasarkan prinsip deklaratif setelah suatu ciptaan diwujudkan dalam bentuk nyata tanpa mengurangi pembatasan sesuai dengan ketentuan peraturan perundang-undangan.

Ketentuan Pidana Pasal 113

- (1) Setiap Orang yang dengan tanpa hak melakukan pelanggaran hak ekonomi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf i untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 1 (satu) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp 100.000.000 (seratus juta rupiah).
- (2) Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf c, huruf d, huruf f, dan/atau huruf h untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 3 (tiga) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp 500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).
- (3) Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf a, huruf b, huruf e, dan/atau huruf g untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 4 (empat) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp 1.000.000.000,00 (satu miliar rupiah).
- (4) Setiap Orang yang memenuhi unsur sebagaimana dimaksud pada ayat (3) yang dilakukan dalam bentuk pembajakan, dipidana dengan pidana penjara paling lama 10 (sepuluh) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp 4.000.000.000,00 (empat miliar rupiah).

TEKNOLOGI PENGELOLAAN Spent Bleaching Earth

Dr. Julfi Restu Amelia, S.T.P., M.Si | Dr. Eng. Dewi Agustina Iryani, S.T., M.T
Prof. Dr. Eng. Ir. Udin Hasanudin, M.T. | Ir. Ribut Sugiharto, M.Sc.
Simparmin Br Ginting, S.T., M.T. | Lathifa Indrangingtyas, S.TP. M.Sc.



Perpustakaan Nasional RI:
Katalog Dalam Terbitan (KDT)

**TEKNOLOGI PENGELOLAAN
SPENT BLEACHING EARTH**

Penulis

Dr. Julfi Restu Amelia, S.T.P., M.Si.
Dr. Eng. Dewi Agustina Iryani, S.T., M.T.
Prof. Dr. Eng. Ir. Udin Hasanudin, M.T.
Ir. Ribut Sugiharto, M.Sc.
Simparkin Br Ginting, S.T., M.T.
Lathifa Indraningtyas, S.T.P. M.Sc.

Desain Cover & Layout

Team Aura Creative

Penerbit

AURA

CV. Anugrah Utama Raharja

Anggota IKAPI

No.003/LPU/2013

xii + 116 hal : 15.8 x 23 cm
Cetakan, Mei 2023

ISBN: 978-623-211-351-0

Alamat

Jl. Prof. Dr. Soemantri Brojonegoro, No 19 D
Gedongmeneng Bandar Lampung
HP. 081281430268
082282148711

E-mail : redaksiaura@gmail.com
Website : www.aura-publishing.com

Hak Cipta dilindungi Undang-undang

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kehadirat Allah SWT karena atas karunia-Nya buku dengan judul “**Teknologi Pengelolaan Spent Bleaching Earth**” telah diselesaikan oleh Penulis. Buku ini disusun mengingat pentingnya pengelolaan *spent bleaching earth* (SBE) sebagai limbah utama yang dihasilkan oleh proses industri oleochemical dan/atau pengolahan minyak hewani atau nabati yang termasuk dalam limbah B3 kategori 2 dengan kode limbah B413. Teknologi pengelolaan SBE yang terdapat di dalam buku ini salah satunya adalah berdasarkan hasil riset tim peneliti dari Universitas Lampung dan Universitas Sahid mengenai pemanfaatan/proses *recovery* SBE sebagai inovasi untuk mengurangi emisi gas rumah kaca (GRK) yang dapat timbul jika SBE dikelola dengan sistem *landfill* atau dibakar. Riset yang dilakukan yaitu mengenai karakterisasi dan analisis pemanfaatan/proses *recovery* SBE serta minyak yang terperangkap di dalam SBE sebagai hasil samping proses pemurnian minyak sawit menjadi biodiesel atau produk oleokimia lain, untuk mengurangi beban lingkungan dan meningkatkan citra unggul industri sawit.

Buku ini merupakan rangkuman dari beberapa proses studi pustaka tentang SBE, pengelolaan SBE serta hasil penelitian tentang proses pengelolaan SBE yang terdiri dari teknik ekstraksi, reaktivasi menjadi adsorbent dan katalis baik pada proses pemucatan, penjumlahan betacarotene serta pemanfaatannya sebagai katalis pada proses produksi biodiesel. Penulis mengucapkan terimakasih sebesar-besarnya kepada Badan Pengelola Dana Perkebunan Kelapa Sawit (BPDPKS) yang telah memberikan pendanaan sehingga penelitian dan penyusunan buku dapat terlaksana. Buku ini diharapkan dapat menjadi referensi bagi pihak pengambil kebijakan, industry, peneliti dalam upaya pengelolaan SBE, serta mendukung *circular economy* di Indonesia.

Bandar Lampung, 4 Mei 2023

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR.....	viii
BAB I. PENDAHULUAN	1
BAB II. HILIRISASI MINYAK SAWIT	5
BAB III. INDUSTRI REFINERY MINYAK SAWIT	17
BAB IV. SPENT BLEACHING EARTH (SBE)	24
BAB V. TEKNOLOGI PENGELOLAAN DAN PEMANFAATAN SPENT BLEACHING EARTH (SBE).....	31
BAB VI. PROSES RECOVERY SPENT BLEACHING EARTH (SBE) DALAM Mendukung SYSTEM CIRCULAR ECONOMY	68
DAFTAR PUSTAKA	106

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.	Negara tujuan utama dan jumlah ekspor CPO (Kusnandar, 2022).....	6
Gambar 2.	Gambaran industri CPO Indonesia 2020-2021 (GAPKI, 2022).....	7
Gambar 3.	Hubungan antara pabrik kelapa sawit dengan industri hilirnya (Ditjen Industri Agro, 2020).....	9
Gambar 4.	Jumlah industri minyak goreng beberapa Provinsi di Indonesia (BPS, 2020).....	12
Gambar 5.	Perkembangan produksi biodiesel dari tahun 2009-2022 di Indonesia (Kusnandar, 2022)	15
Gambar 6.	Perbandingan kinerja pertumbuhan tanaman Okra [(a) tinggi tanaman, (b) ukuran daun, (c) diameter batang dan (d) ukuran buah] pada perlakuan pemupukan yang berbeda (A) kontrol, (B) kotoran ayam dan (c) kompos dari SBE (SBE-based bio-organic), setelah percobaan lapangan selama 3 bulan (Sumber: Loh et al., 2013).....	43
Gambar 7.	Pupuk NPK yang menggunakan (a) brown clay dan (b) SBE (Wilmar Group Indonesia, 2020).....	49
Gambar 8.	SEM permukaan semen portland dan PSBE (Rokiah et al., 2019).....	51
Gambar 9.	Kekuatan tekan beton ringan: kontrol M (100%OPC tanpa foam), FC (100% OPC dengan foam) dan FC dengan penggunaan 10-40% Processed Spent Bleaching Earth (PSBE) (Rokiah et al., 2019).....	52

Gambar 10.	Kurva termogram (TG/DTG) untuk karakterisasi SBE dan ESBE.....	71
Gambar 11.	Kurva thermogram (TG/DTG/DTA).....	72
Gambar 12.	Minyak residu hasil ekstraksi dengan metode sokletasi (a) Pelarut Heksana ; (b) Pelarut Diklorometana.....	75
Gambar 13.	Perubahan warna SBE sebelum dan sesudah diaktivasi secara kimia dan termokimia	76
Gambar 14.	Hasil FTIR Spectogram pada SBE dan RBE dengan perlakuan H₂SO₄ pada berbagai konsentrasi dan hasil FTIR Spectogram SBE dan RBE yang diaktivasi dengan H₂SO₄ pada berbagai temperatur dan waktu aktivasi	79
Gambar 15.	Hasil FTIR Spectogram SBE dan RBE yang diaktivasi dengan 5%, 10%, 15% HCl pada berbagai temperatur dan waktu aktivasi.....	80
Gambar 16.	Perbandingan komposisi kimia BE dan SBE sebelum dan sesudah Aktivasi dengan menggunakan berbagai variasi konsentrasi H₂SO₄ pada berbagai temperature dan waktu aktivasi	81
Gambar 17.	Perbandingan komposisi kimia BE dan SBE sebelum dan sesudah Aktivasi dengan menggunakan berbagai variasi konsentrasi HCl pada berbagai temperatur dan waktu aktivasi.....	83
Gambar 18.	Persentase Bleaching Power H₂SO₄ Pada Reaktivasi Kimia dan Kimia Fisika Terbaik.....	84
Gambar 19.	Persentase Bleaching Power HCl Pada Reaktivasi Kimia dan Kimia Fisika Terbaik	84
Gambar 20.	Data hasil analisis SEM BE, SBE dan RBE (H₂SO₄ 15%).....	85
Gambar 21.	Data hasil analisis SEM BE, SBE dan RBE (HCl 15%).....	86

Gambar 22.	Katalis Padat dari RBE HCl 20% dengan Perbedaan Konsentrasi KOH (a) Katalis Konsentrasi KOH 5%, (b) Katalis Konsentrasi KOH 10%, (c) Katalis Konsentrasi KOH 15%, (d) Katalis Konsentrasi KOH 20%, (e) Katalis Konsentrasi KOH 25%.....	89
Gambar 23.	Katalis Padat dari RBE H₂SO₄ 15% dengan Perbedaan Konsentrasi KOH: (a) Sampel Dicuci Menggunakan H₂O₂ 30%, (b) Katalis Konsentrasi KOH 5%, (c) Katalis Konsentrasi KOH 10%, (d) Katalis Konsentrasi KOH 15%, (e) Katalis Konsentrasi KOH 20%, (f) Katalis Konsentrasi KOH 25%.....	89
Gambar 24.	Hasil Analisa SEM Produk Katalis HCl 20% KOH 25%	93
Gambar 25.	Hasil Analisa SEM Produk Katalis H₂SO₄ 15% KOH 20%	93

DAFTAR TABEL

Tabel 1.	Karakteristik kimia SBE (% berat)	20
Tabel 2.	Data jumlah limbah SBE.....	25
Tabel 3.	Data produksi SBE beberapa provinsi di Indonesia Tahun 2021.....	25
Tabel 4.	Konsentrasi komponen utama Spent Bleaching Earth (SBE).....	26
Tabel 5.	Karakteristik Kimia Spent Bleaching Earth (SBE) (% berat).....	26
Tabel 6.	Data penanganan dan pemanfaatan SBE	29
Tabel 7.	Data Pengelolaan Limbah SBE.....	30
Tabel 8	Sifat fisiko-kimia dan HMIS/NFPA Rating BE, CPO, dan ALB.....	36
Tabel 9.	Kandungan NPK dalam SBE dibandingkan dengan sumber biomassa lain	40
Tabel 10.	Karakteristik bleaching earth, spent bleaching earth, dan zeolite.....	40
Tabel 11.	Karakteristik residu minyak dalam spent bleaching earth (SBE)	41
Tabel 12.	Kandungan logam berat yang terkandung di Spent Bleaching Earth.....	48
Tabel 13.	Kandungan oksida mineral pada BE, white clay local, dan brown clay	48
Tabel 14.	Rendemen minyak, asam lemak bebas (FFA), bilangan peroksida (PV), nilai p-Anisidin (AV), dan nilai Totox dari Minyak yang diekstrak dari SBE dengan menggunakan beberapa pelarut.....	62

Tabel 15. Perbandingan hasil ekstraksi dengan hexane dan DCM	70
Tabel 16. Perbandingan hasil ekstraksi menggunakan hexane pada masing-masing metode	71
Tabel 17. Data karakteristik minyak residu	74
Tabel 18. Perbandingan Hasil Analisa BET Bahan Baku	92
Tabel 19. Perbandingan Ukuran Pori Bahan Baku dan Produk Katalis.....	92
Tabel 20. Perbandingan Komposisi Mineral dari Raw material dengan Produk Katalis Padat (Teraktivasi H ₂ SO ₄ 15%)	94
Tabel 21. Perbandingan Komposisi Mineral dari Raw material dengan Produk Katalis Padat (Teraktivasi HCl 20%)..	94
Tabel 22. Pengaruh proses dan variabel yang berbeda terhadap hasil biodiesel (Menggunakan H ₂ SO ₄ 15% KOH 25%)	96
Tabel 23. Basis analisis ekonomi	101
Tabel 24. Estimasi Total Capital Investment (TCI).....	102
Tabel 25. Estimasi Total Production Cost (TPC).....	103
Tabel 26. Perbandingan analisis ekonomi RBE dan RBE-Ba	104



PENDAHULUAN

Sawit merupakan komoditi unggulan Indonesia dan industri sawit diketahui menduduki peringkat pertama di dunia dari sisi produksi dan ekspor. Sebanyak 22 provinsi dari 34 provinsi di Indonesia berhasil mengembangkan perkebunan sawit, dan diketahui sekitar 90% berada di Provinsi yang terdapat Sumatera dan Kalimantan. Produk utama dari pengolahan sawit berupa *Crude Palm Oil* (CPO). Pulau Sumatera dan Kalimantan berkontribusi besar dalam memproduksi CPO yakni sekitar 95%. Indonesia memiliki keunggulan komparatif di semua produk minyak sawit, karena mampu menguasai produksi minyak sawit dunia. Data Badan Pusat Statistik Tahun 2021 menyebutkan ekspor minyak kelapa sawit (CPO dan produk turunannya) mengalami kenaikan paling tinggi selama kurun waktu 5 tahun terakhir, yakni sekitar US\$ 27,6 miliar, dengan pertumbuhan sebesar 58,79% dibandingkan tahun sebelumnya. Teknologi pengolahan CPO dibedakan menjadi proses *upstream* dan *downstream*. Teknologi pengolahan CPO *upstream* merupakan teknologi proses pengolahan CPO dari tandan buah segar (TBS) menjadi CPO, sedangkan teknologi pengolahan *downstream* merupakan teknologi proses pengolahan CPO menjadi produk hilir lanjutan berupa produk pangan (*oleofood*) maupun produk non pangan (*oleokimia* dan *biofuel*).

Pemerintah Indonesia pada Tahun 2011 mengeluarkan kebijakan hilirisasi industri minyak sawit dengan memberikan kemudahan untuk industri sawit dalam memproduksi berbagai produk hilir CPO. Hal tersebut berdampak pada peningkatan yang cukup pesat dalam hilirisasi produksi olahan minyak sawit. Hilirisasi CPO Indonesia dikelompokkan menjadi tiga jalur hilirisasi, yakni jalur hilirisasi oleopangan *complex* (seperti minyak goreng sawit, margarin, vitamin A, Vitamin E, shortening, dan lain-lain), oleokimia *complex* (seperti produk biosurfaktan, seperti produk detergen, sabun, shampo, dan lain-lain), dan *biofuel complex* (seperti biodiesel, biogas, biopremium, dan bioavtur). Gabungan Pengusaha Kelapa Sawit Indonesia (GAPKI) menyebutkan nilai ekspor produk kelapa sawit pada Mei 2021 senilai US\$ 3,06 miliar atau setara dengan Rp 44,41 triliun (asumsi kurs Rp 14.500/US\$). Produk hilir sawit mengalami peningkatan seiring dengan ragam produk turunan minyak sawit yang semakin banyak. Ekspor komposisi 60:40 pada Tahun 2010, namun pada tahun 2018 komposisi tersebut berubah menjadi 19:81. Produk hilir pada Tahun 2010 berjumlah 72 jenis, lalu meningkat menjadi 158 jenis pada Tahun 2018. Diversifikasi produk hilir sawit terus didorong oleh Pemerintah untuk mencapai target pada Tahun 2030 sebanyak 200 jenis. Peningkatan produk hilir tersebut didominasi dengan produk pangan dan bahan kimia. Kapasitas industri hilir minyak sawit juga semakin meningkat. Saat ini, industri pemurnian (*refinery*) minyak nabati mencapai 86 unit dengan kapasitas 56 juta ton/tahun, industri biodiesel 19 unit dengan kapasitas 12 juta kilo liter/tahun, dan industri oleokimia 21 unit dengan kapasitas 11,3 juta ton/tahun. Gabungan Industri Minyak Nabati Indonesia (GIMNI) menyebutkan bahwa terdapat 75 perusahaan di Indonesia yang mengolah CPO menjadi minyak goreng, dan 8 diantaranya telah mengekspor produknya. Data Kementerian Perindustrian Republik Indonesia mencatat terdapat 47 industri yang memproduksi minyak goreng, dengan berbagai merek, seperti Bimoli, Filma, Sunco, Sania, Fortune, dan sebagainya.

Proses pengolahan CPO menjadi minyak goreng memerlukan proses pemurnian (*refinery*). Proses tersebut terdiri atas beberapa tahapan, salah satunya pemucatan (*bleaching*). Proses *bleaching* berfungsi untuk mengurangi warna CPO dari berwarna coklat menjadi kuning jernih, serta menghilangkan sisa kotoran, gum getah, dan sisa asam lemak bebas (ALB). Proses *bleaching* pada umumnya dengan menggunakan lempung aktif atau tanah pemucat yang dikenal dengan nama *bleaching earth*. *Bleaching earth* merupakan suatu mineral alami yang berfungsi dalam penjernihan dan penyerapan kotoran yang terdapat dalam CPO atau minyak nabati lainnya. Jumlah *bleaching earth* yang digunakan pada umumnya berkisar 0,5-2,0% dari total CPO yang dimurnikan, tergantung pada kualitas CPO yang akan diolah pada proses pemurnian. Kebutuhan *bleaching earth* pada Tahun 2016 mencapai 700 ribu ton, dimana 60% bahan tersebut diimpor dari luar negeri, terutama dari India dan China. Jumlah konsumsi *bleaching earth* untuk proses pemurnian CPO di Indonesia semakin meningkat seiring dengan semakin berkembangnya industri hilir minyak nabati di Indonesia. Proses *bleaching* selain menghasilkan produk utama berupa minyak dengan kadar pengotor yang relatif rendah, juga menghasilkan limbah berupa *spent bleaching earth* (SBE).

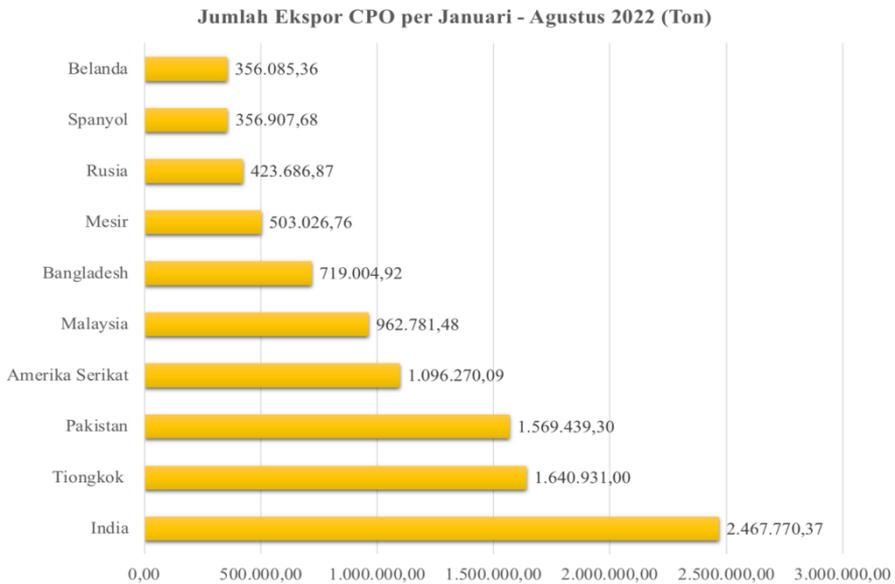
SBE merupakan limbah padat yang diproduksi dari proses *bleaching* pada industri pengolahan CPO menjadi minyak goreng dan oleokimia. SBE diketahui sebagai limbah terbesar pada industri pemurnian CPO. SBE mengandung kotoran, bahan pewarna, dan minyak yang terserap. Jumlah minyak yang terserap pada SBE berkisar 20-40%. SBE yang dihasilkan dari proses pemurnian minyak nabati semakin meningkat, seiring dengan peningkatan kapasitas industri pemurnian minyak nabati. Data Direktorat Jenderal Pengelolaan Sampah, Limbah, Bahan Beracun dan Berbahaya (PSLB3) menyebutkan SBE yang dihasilkan dari proses pemurnian minyak nabati di Indonesia pada Tahun 2019 mencapai 779 ribu ton. Dari jumlah tersebut, sebanyak 51,47% SBE diolah, sedangkan

sisanya sekitar 48,39% disimpan atau ditimbun. SBE dikelompokkan limbah bahan beracun berbahaya (B3) kategori 2 dengan kode limbah B413 (PP 101, 2014). SBE dikategorikan sebagai limbah B3 karena mengandung minyak yang tinggi serta memiliki karakteristik yang mudah menyala dan bersifat korosif. SBE bisa dikategorikan sebagai limbah non-B3 apabila kandungan minyaknya di bawah tiga 3%. Mengingat jumlah SBE yang semakin banyak dan tinggi kandungan minyak, serta tergolong ke dalam limbah B3, sehingga diperlukan penanganan dan pengelolaan yang tepat. Pengelolaan SBE penting dilakukan untuk mencegah pencemaran lingkungan sekaligus dapat memberikan manfaat sosial dan ekonomi (sirkular ekonomi). Teknologi proses pengelolaan SBE juga harus diperhatikan agar tidak menimbulkan permasalahan lingkungan yang baru serta tidak menghambat upaya pemerintah untuk meningkatkan hilirisasi industri CPO di dalam negeri. Berdasarkan hal tersebut, buku ini akan membahas terkait hilirisasi minyak sawit (CPO), industri *refinery* CPO, limbah SBE, teknologi pemanfaatan SBE, dan penelitian-penelitian terkait pengelolaan SBE yang sudah dilakukan.



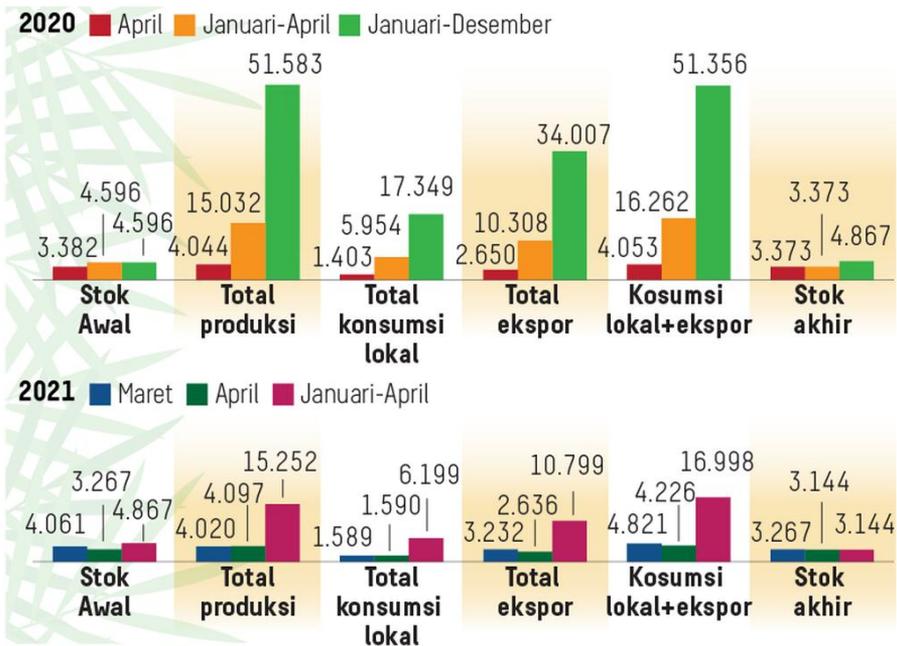
HILIRISASI MINYAK SAWIT

Industri pengolahan sawit diketahui memiliki peran penting bagi pertumbuhan perekonomian nasional. Industri tersebut mampu menyerap hasil produksi petani dan meningkatkan kesejahteraan petani sawit swadaya. Data Bappenas Tahun 2018 menyebutkan bahwa industri pengolahan sawit mampu menyerap 16,2 juta orang tenaga kerja dengan rincian 4,2 juta tenaga kerja langsung dan 12 juta tenaga kerja tidak langsung. Industri pengolahan sawit juga merupakan salah satu sektor unggulan yang menopang perekonomian nasional. Industri tersebut memiliki kontribusi sebesar 17,6% dari total ekspor nonmigas pada Tahun 2021, dengan ekspor produk sawit sekitar 40,31 juta ton dengan nilai ekspor USD35,79 miliar. Nilai tersebut mengalami peningkatan sebesar 56,63% dari nilai ekspor Tahun 2020. Badan pusat statistik (BPS) melaporkan nilai ekspor periode Januari-Agustus pada Tahun 2022 juga masih mencatat pertumbuhan 3,99% menjadi US\$,19,37 miliar atau setara Rp290 triliun (dengan kurs Rp15.000 per dolar Amerika Serikat/AS) jika dibandingkan dengan periode yang sama tahun di Tahun 2012, yakni hanya sebesar US\$18,62 miliar. Beberapa negara tujuan utama ekspor CPO Indonesia yakni India, Tiongkok, Pakistan, Amerika Serikat, Malaysia, Bangladesh, Mesir, Rusia, Spanyol, Belanda. Negara tujuan dan jumlah ekspor *crude palm oil* (CPO) terdapat pada gambar 1.



Gambar 1. Negara tujuan utama dan jumlah ekspor CPO
(Kusnandar, 2022)

Industri pengolahan sawit juga dapat memberikan *multiplier effect* dalam menciptakan pusat-pusat pertumbuhan ekonomi baru. Sebagai contoh, kawasan industri baru yang berbasis sawit terus berkembang seperti di daerah Dumai (Provinsi Riau), daerah Sei Mangkei dan Kuala Tanjung (Provinsi Sumatera Utara), daerah Tarjun (Provinsi Kalimantan Timur), dan daerah Bitung (Provinsi Sulawesi Utara) juga mampu menggerakkan aktivitas produktif kegiatan usaha kebun di sektor sawit, khususnya yang terdapat di daerah terluar, tertinggal, dan terdalam (3T). Gambaran tentang industri CPO Indonesia Tahun 2020-2021 terdapat pada Gambar 2.

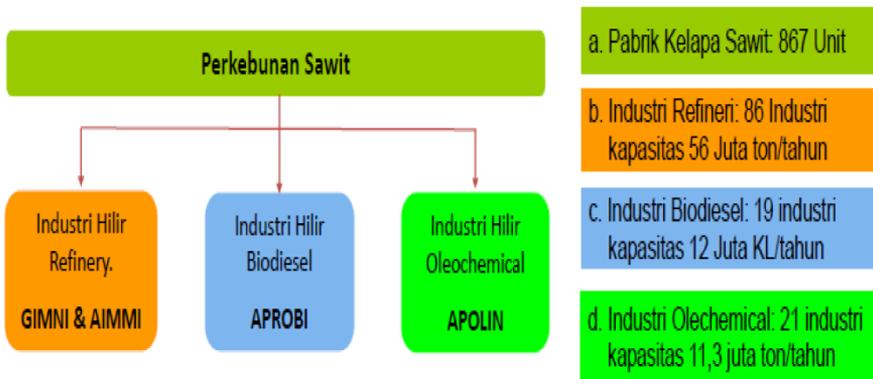


Gambar 2. Gambaran industri CPO Indonesia 2020-2021 (GAPKI, 2022)

Industri pengolahan sawit juga dapat memberikan nilai tambah bagi sawit melalui hilirisasi produk. Dengan adanya hilirisasi produk atau hilirisasi industri, komoditas yang diekspor bukan lagi dalam bahan baku, namun sudah dalam bentuk produk turunan atau barang jadi, sehingga bisa memberikan nilai tambah bagi komoditas. Selain itu, hilirisasi produk dapat memperkuat struktur industri, memberikan lapangan kerja baru, serta memberi peluang usaha baru. Di industri sawit, hilirisasi merupakan cara efektif untuk mendorong peningkatan *multiplier effect* di sektor CPO. Hilirisasi CPO bertujuan untuk memproduksi produk-produk bernilai tambah yang lebih tinggi untuk tujuan ekspor dan juga memproduksi produk-produk yang selama ini masih impor. Hilirisasi CPO yang ada saat ini terdiri dari tiga jalur hilirisasi, yakni:

1. Hilirisasi oleopangan (*oleofood complex*), yakni industri yang mengolah produk industri pemurnian CPO menjadi produk antara dan produk jadi oleopangan, seperti minyak goreng, margarin, *shortening*, *Cocoa Butter Alternatives (CBA)*, dan sebagainya. Beberapa tujuan hilirisasi *oleofood complex* yaitu mencukupi nutrisi/gizi dan kesehatan masyarakat, menghasilkan produk baru pangan modern yang sehat dan menyehatkan, menjamin keamanan penggunaan produk pangan turunan minyak sawit nasional, serta memperkuat basis industri pangan olahan yang berbahan baku/bahan penolong minyak sawit dan turunannya.
2. Hilirisasi oleokimia (*oleochemical complex*), yakni industri yang mengolah produk pemurnian CPO menjadi produk oleokimia, seperti detergen, sampo, sabun, biosurfaktan, biomaterial, biolubrikan, dan sebagainya. Beberapa tujuan hilirisasi oleokimia yaitu mendorong masuknya investasi produksi material produk baru yang mensubstitusi produk bersumber tak terbarukan (petrochemical) dan memperkuat basis industri pengguna biomaterial turunan sawit.
3. Hilirisasi *biofuel*, industri yang mengolah produk pemurnian CPO menjadi produk-produk *biofuel*, seperti biodiesel, bioetanol, biogas, dan bioavtur. Beberapa tujuan hilirisasi *biofuel* berbasis sawit yaitu mengurangi impor BBM khususnya BBM diesel oil, mendorong pengembangan teknologi *greenfuel* yang dapat menghasilkan BBM gasoline, diesel, dan avtur langsung dari minyak sawit, memperkuat potensi cadangan energi nasional dari sumber terbarukan untuk operasi militer perang dan selain perang, mengurangi emisi gas rumah kaca dari bahan bakar terbarukan, serta mengupayakan produksi dan penggunaan bahan bakar bio yang rumah lingkungan dan lestari berkelanjutan.

Produksi *oleofood* dilakukan oleh industri yang tergabung dalam Gabungan Industri Minyak Nabati Indonesia (GIMNI) dan Asosiasi Industri Minyak Makan Indonesia (AIMMI). Produk oleokimia diproduksi oleh industri yang tergabung dalam Asosiasi Produsen Oleochemical Indonesia (APOLIN), Biofuel oleh industri yang tergabung dalam APROBI (Asosiasi Produsen Biofuel Indonesia). Hubungan antara perkebunan sawit dan pabrik kelapa sawit dengan beberapa industri hilirnya serta kapasitas masing-masing dari industri tersebut pada tahun 2019 terdapat pada gambar 3.



Gambar 3. Hubungan antara pabrik kelapa sawit dengan industri hilirnya (Ditjen Industri Agro, 2020)

Hilirisasi CPO di atas perlu didukung dengan adanya kebijakan industrialisasi, yaitu berupa kebijakan promosi ekspor (EO) dan kebijakan substitusi impor (SI). Hilirisasi CPO dengan kebijakan EO dilaksanakan secara bertahap, yakni a) tahap pertama dengan mengubah ekspor produk CPO menjadi produk hilir setengah jadi, seperti *refining bleaching deodorizing palm oil* (RBDPO), RBD stearin/olein, *fatty acid*, gliserol, dan sebagainya, serta b) tahap kedua yakni mengubah produk yang diekspor menjadi produk oleopangan kemasan, oleokimia jadi, dan biofuel. Hilirisasi CPO dengan kebijakan SI juga dilaksanakan secara bertahap, yakni a) memproduksi produk antara yang selama ini masih diimpor oleh

negara, dan 2) memproduksi produk jadi untuk mensubstitusi produk jadi yang selama ini juga masih diimpor, misalkan memproduksi biodiesel untuk mengganti solar, memproduksi biopelumas untuk mengganti petropelumas, memproduksi bioplastik untuk mengganti petroplastik. Berdasarkan hal-hal tersebut di atas, dapat disimpulkan terdapat empat kombinasi kebijakan dalam hilirisasi CPO, yaitu:

1. Hilirisasi yang dilakukan untuk memproduksi dan mengekspor produk antara dan sekaligus mengganti (substitusi) produk antara yang masih impor
2. Hilirisasi yang dilakukan untuk memproduksi dan mengekspor produk antara dan sekaligus mengganti (substitusi) produk jadi yang masih impor
3. Hilirisasi yang dilakukan untuk memproduksi dan mengekspor produk jadi dan sekaligus mengganti (substitusi) produk antara yang masih impor
4. Hilirisasi yang dilakukan untuk memproduksi dan mengekspor produk jadi dan sekaligus mengganti (substitusi) produk jadi yang masih impor

Ekspor produk turunan CPO selama kurun waktu 10 tahun mengalami peningkatan yang signifikan, yakni pada Tahun 2010 hanya berjumlah 20% dan pada Tahun 2020 meningkat menjadi 80%. Hal tersebut sesuai dengan target peta jalan pengembangan industri hilir kelapa sawit yang termaktub di dalam Peraturan Menteri Perindustrian No 13 Tahun 2010. Outlook perekonomian Indoensia 2023 melaporkan ekspor produk industri berbasis sawit mencapai US\$ 29 miliar pada September Tahun 2022 dan pada Tahun 2023 ditargetkan nilai ekspor produk tersebut mencapai US\$ 35-40 miliar dengan pertumbuhan industri bisa mencapai 5-5,5 %. Data Kementerian Perdagangan menunjukkan bahwa kontribusi produk turunan CPO mencapai 75% dari seluruh ekspor minyak sawit Indonesia. Volume ekspor olahan CPO sepanjang Tahun 2021

menunjukkan kenaikan sebesar 13% pada oleofood, 0,7% pada oleokimia, dan 0,4% pada biodiesel. Jenis produk hilir CPO juga mengalami peningkatan. Pada Tahun 2011, hanya terdapat 54 jenis produk hilir CPO, namun pada Tahun 2022 sudah terdapat 168 jenis produk hilir CPO yang mampu diproduksi untuk kebutuhan pangan, fitofarmaka, oleokimia, hingga energi terbarukan.

Salah satu produk hilir CPO yang banyak diproduksi dan dibutuhkan baik dalam main luar negeri adalah minyak goreng. Data Kementerian Perindustrian melaporkan bahwa realisasi produksi minyak goreng pada Tahun 2021 sekitar 20,22 juta ton. Dari jumlah tersebut, sekitar 25.07% digunakan untuk memenuhi dalam negeri dan sekitar 74,93% untuk ditujukan untuk memenuhi kebutuhan ekspor. Dari jumlah tersebut juga diketahui bahwa sekitar 32% diproduksi untuk memenuhi kebutuhan curah industri, 42% untuk memenuhi kebutuhan rumah tangga, 4% untuk kemasan sederhana, dan 22% untuk kemasan premium. Badan Pusat Statistik melaporkan jumlah pabrik atau industri yang mengolah CPO menjadi minyak goreng sebanyak 74 industri pada Tahun 2020. Tiga provinsi yang memiliki industri minyak goreng terbanyak yaitu Jawa Timur, Sumatera Utara, dan DKI Jakarta. Jumlah pabrik minyak goreng di Provinsi Indonesia pada Tahun 2020, terdapat pada Gambar 4.

Industri minyak goreng merupakan industri hilir yang paling banyak menyerap CPO. Sebagian besar produk minyak goreng yang beredar berasal dari minyak CPO. Minyak goreng yang berasal dari CPO lebih disukai karena memiliki harga yang relatif murah dibandingkan dengan minyak goreng nabati lainnya. Permintaan dan pangsa pasar yang terus mengalami peningkatan dari tahun ke tahun menjadikan industri minyak goreng sawit menjadi industri yang paling cepat berkembang. Rerata pertumbuhan jumlah industri minyak goreng berbasis CPO sebesar 11%/tahun, dengan peningkatan konsumsi CPO sebagai bahan baku sebesar 415/tahun. Sebagai tambahan, industri tersebut juga diketahui dapat

menghasilkan nilai tambah dengan rata-rata sebesar Rp. 17,60 triliun/tahun.



Gambar 4. Jumlah industri minyak goreng beberapa Provinsi di Indonesia (BPS, 2020)

Produk hilir berbasis sawit lainnya yang banyak diproduksi dan diimplementasikan adalah *biofuel*. *Biofuel* merupakan bahan bakar yang dihasilkan dari material organik dan umumnya berasal dari makhluk hidup. *Biofuel* juga dapat didefinisikan sebagai bahan bakar yang diproduksi dari biomassa sebagai fraksi dari hasil biodegradasi dari limbah atau residu pertanian (baik yang berasal dari nabati maupun hewani), industri kehutanan dan terkait, dan sebagian kecil hasil biodegradasi dari limbah industri dan kota. Produksi *biofuel* memiliki penting dalam pencapaian target penggantian petroleum dengan menggunakan bahan bakar alternatif. Produksi *biofuel* juga berperan penting dalam target pereduksian emisi gas rumah kaca, terutama karbon dioksida, dalam jangka panjang. *Biofuel* yang diproduksi menggunakan sumber terbarukan, misalkan CPO, dapat memberikan beberapa keuntungan berupa nilai tambah komoditi

semakin meningkat melalui hilirisasi industri pertanian dalam negeri, mampu menstabilkan harga CPO, meningkatkan kesejahteraan petani dan masyarakat, menghasilkan lebih sedikit emisi gas rumah kaca (GRK) sehingga lebih ramah lingkungan, menghemat devisa negara dan neraca perdagangan, menyediakan kesempatan kerja, serta untuk menjaga ketahanan energi dengan mengurangi bahan bakar impor. Salah satu jenis *biofuel* yang dapat diproduksi dengan bahan baku sawit adalah biodiesel.

Biodiesel merupakan bahan bakar terbarukan yang terdiri dari campuran monoalkil ester dari asam lemak rantai panjang. Biodiesel dapat dijadikan sebagai alternatif bagi bahan bakar mesin diesel. Biodiesel dihasilkan dari reaksi transesterifikasi minyak dengan menggunakan alkohol (metanol atau etanol) dan katalis basa (KOH, NaOH, atau katalis basa yang lain). Biodiesel memiliki beberapa kelebihan jika dibandingkan bahan bakar petroleum, yakni tidak beracun, memiliki angka setana yang tinggi, dan bersifat biodegradasi. Penggunaan biodiesel sebagai bahan bakar juga dapat mengurangi emisi karbonmonoksida, hidrokarbon dan NOx. Pengembangan industri biodiesel memiliki peran strategis dan berpengaruh positif pada berbagai aspek. Pangsa Energi Terbarukan pada Tahun 2021 mencapai 11,7% dari total bauran energi dan biodiesel berkontribusi sekitar 35%. Implementasi biodiesel yang telah dilakukan menjadikan Indonesia sebagai *pioneer* dalam pemanfaatan dan penggunaan biodiesel. Penggunaan biodiesel pada tahun 2020 sebesar 30% (B30). Dari penggunaan B30, nilai ekonomi yang telah diperoleh dari pada Tahun 2021 mencapai lebih dari USD 4 miliar. Penggunaan B30 juga memberikan dampak positif pada aspek lingkungan, yakni mampu menurunkan emisi Gas Rumah Kaca (GRK) sampai dengan 25 juta karbondioksida (CO₂). Perkembangan produksi biodiesel dari tahun 2009-2022 terdapat pada gambar 5..

Data BPS melaporkan volume ekspor biodiesel Indonesia mencapai 180,75 ribu ton dengan nilai total US\$191,99 juta paa tahun

2021, dengan rincian produk, volume, serta nilai ekspor biodiesel sebagai berikut:

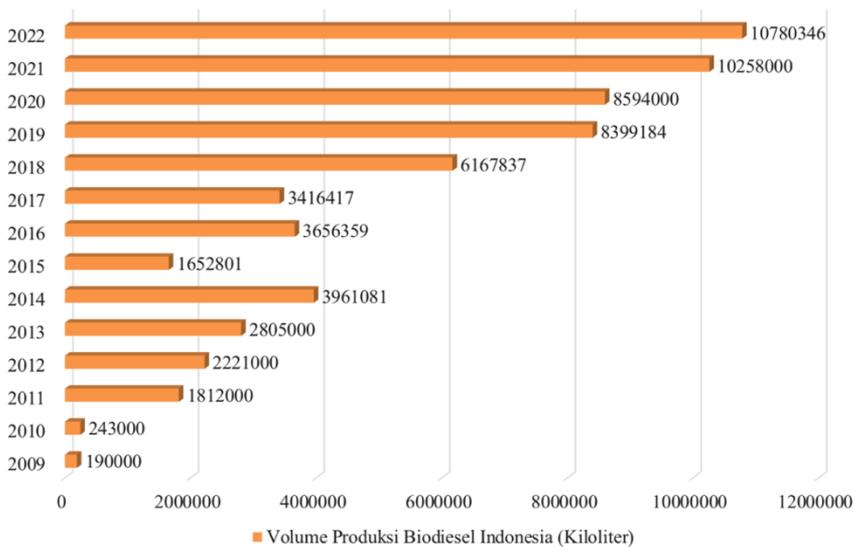
- Biodiesel tidak mengandung minyak bumi; kandungan alkil >98% (HS 38260022) seberat 114,11 ribu ton senilai US\$122,2 juta.
- Biodiesel tidak mengandung minyak bumi; kandungan alkil ≥96,5%-98% (HS 38260021) seberat 57,33 ribu ton senilai US\$ 63,45 juta.
- Biodiesel tidak mengandung minyak bumi; kandungan alkil <96,5% (HS 38260029) seberat 6,29 ribu ton dengan nilai US\$ 4,3 juta.
- Biodiesel dan campurannya, mengandung minyak bumi; <70% (HS 38260090) seberat 3,02 ribu ton dengan nilai US\$2,05 juta.

Kebijakan Pemerintah Indonesia terkait mandatori B35 dapat semakin mendukung pemanfaatan CPO sebagai bahan baku dalam memproduksi biodiesel. Mandatori tersebut mewajibkan pencampuran biodiesel sebanyak 35% ke dalam minyak solar mulai 1 Februari 2023. Implementasi B35 diketahui sebagai salah satu bentuk komitmen pemerintah untuk mengatasi krisis iklim dengan mengurangi emisi GRK secara signifikan, yaitu percepatan energi yang inklusif, bersih, berkelanjutan dan mendorong investasi untuk mencapai *Net Zero Emission*.

Selain minyak goreng dan biodiesel, masih banyak lagi produk hilirisasi dari CPO, seiring dengan program percepatan hilirisasi yang dilakukan oleh Pemerintah. Namun, percepatan hilirisasi tersebut memiliki beberapa kendala, yakni:

- a) Industri CPO dan pengolahan CPO saat ini masih mengandalkan listrik dari PLN dalam menyuplai energi, namun sering terjadi pasokan listrik tersebut terputus.
- b) Energi yang digunakan saat ini dinilai tidak *cost-effective* dan tidak ramah lingkungan, karena masih menggunakan gas dan

- batu bara. Gas memiliki harga yang relatif tinggi dan batu bara dapat mencemari lingkungan karena mengandung SO_x
- c) Infrastruktur yang belum memadai. Infrastruktur seperti jalan, pelabuhan, dan *dry port* yang belum memadai menyebabkan gangguan dalam kelancaran arus logistik yang menghubungkan pusat industri, pelabuhannya dan kawasan ekonomi khusus (KEK). Adanya gangguan tersebut dapat mengakibatkan peningkatan biaya logistik dan akan berdampak pada peningkatan biaya produksi sehingga harga produk hilir akan mengalami peningkatan.



Gambar 5. Perkembangan produksi biodiesel dari tahun 2009-2022 di Indonesia (Kusnandar, 2022)

Industri pengolahan sawit di Indonesia dibangun dengan pendekatan yang memprioritaskan keseimbangan antara aspek sosial, ekonomi dan lingkungan, sehingga target dari pembangunan berkelanjutan dapat tercapai. Dengan pendekatan tersebut, Pemerintah Indonesia yakin industri pengolahan sawit yang berkelanjutan mampu memberikan kontribusi signifikan terhadap pencapaian *Sustainable Development Goals* (SDGs).

Pembangunan berkelanjutan dalam RPJMN 2020-2024 telah ditetapkan sebagai salah satu aspek pengarusutamaan. Hal tersebut bertujuan dalam memberikan akses pembangunan yang adil dan inklusif, sekaligus tetap menjaga lingkungan hidup agar tetap dapat berfungsi sebagai mana mestinya, sehingga mampu meningkatkan kualitas kehidupan.



INDUSTRI *REFINERY* MINYAK SAWIT

Hilirisasi Crude palm oil (CPO) berupa oleopangan *complex*, oleokimia *complex*, dan *biofuel complex* memerlukan tahapan krusial untuk menghasilkan produk hilir yang berkualitas. Tahapan tersebut dikenal sebagai proses pemurnian/*refinery*. Industri *refinery* merupakan pintu gerbang hilirisasi CPO, dimana industri tersebut akan mengolah CPO/CPKO menjadi produk antara yakni olein, stearin, dan *Palm Fatty Acid Distillate* (PFAD) dan produk jadi. Proses *refinery* merupakan proses pengolahan CPO yang dilakukan untuk menghilangkan *free fatty acid* (FFA), bau, serta bahan pengotor lainnya sehingga menghasilkan produk yang memenuhi syarat mutu. Proses *refinery* dibagi menjadi dua proses, yakni *physical refining method* dan *chemical refining method*. Proses *physical refining* merupakan proses pengolahan minyak CPO yang sudah diperkenalkan sejak tahun 1973. Proses tersebut dibagi menjadi beberapa tahapan, yakni *Pretreatment* (*Degumming*), *Bleaching Filtration*, dan *Deodorization*.

Bahan yang digunakan pada proses *physical refining* yakni CPO dan produk yang dihasilkan berupa *refined bleached deodorized* (RBD) oil dan *palm fatty acid distillate*. Proses *physical refining* dimulai dari proses *pretreatment* (*degumming*). *Degumming* merupakan tahapan yang bertujuan untuk memisahkan getah dan lendir (fosfolipid, protein, residu dan karbohidrat) pada CPO tanpa

mengurangi jumlah asam lemak bebas (ALB). Prinsip kerja *degumming* yakni memisahkan senyawa fosfatida ke dalam fase air sehingga dapat dipisahkan dengan cara pengendapan, penyaringan, atau sentrifugasi. Proses tersebut dapat dilakukan dengan beberapa cara, yakni dengan menggunakan asam (asam sulfat, asam fosfat, asam sitrat, dan lainnya), natrium klorida (NaCl), enzim, dan teknologi membran. Proses *degumming* menggunakan air dan asam diketahui lebih efektif dalam memisahkan getah dan lendir yang terdapat pada CPO karena asam dapat mengikat kotoran seperti logam yang berupa fosfatida dan air dapat melarutkan asam dan memisahkan kotoran-kotoran yang tidak larut dalam lemak. Proses *degumming* dengan menggunakan kedua bahan tersebut juga banyak digunakan oleh industri karena penggunaannya lebih ekonomis, aman apabila dikonsumsi dalam jumlah banyak, serta ketersediaan bahan mudah ditemukan. Secara umum, tahapan proses *degumming* dimulai dengan penambahan asam fosfat (konsentrasi 80-85%) sekitar 0.05-0.2% dari CPO. Campuran tersebut dipanaskan hingga 90-110 °C sekitar 15-30 menit. Setelah proses *degumming*, tahapan proses selanjutnya yaitu pemucatan (*bleaching*).

Proses *bleaching* dilakukan dengan penambahan *bleacher* sekitar 0.8 - 2%, tergantung pada kualitas dari CPO. Proses *bleaching* dilakukan dengan menggunakan tekanan vakum, sekitar 20-25 mmHg, pada suhu 95-110 °C selama 30-45 menit. Proses *bleaching* CPO dilakukan dengan penambahan absorben berupa *Bleaching Earth* (BE). BE mempunyai nama yang berbeda di setiap negara, seperti Floridin (Florida earth) yang terdapat di Amerika, Fuller's Earth yang berasal dari Inggris, dan Gluchow Kaolin yang berasal dari Rusia, Kanada, Jepang. BE diketahui telah lama digunakan di dalam proses adsorpsi komponen warna dalam minyak nabati. Pada awalnya BE digunakan dalam bentuk bentonit alami tanpa proses aktivasi. Pada umumnya, BE dalam bentuk alami hanya mampu menyerap ion-ion bermuatan positif, baik ion anorganik

maupun organik. Hal ini terjadi karena mineral montmorillonit yang terdapat dalam bentonit mempunyai lapisan silikat yang bermuatan negatif dengan lingkungan permukaan mineral yang bersifat hidrofilik. Untuk meningkatkan kemampuan bentonit dalam menyerap senyawa-senyawa organik, terutama yang bersifat nonpolar, seperti senyawa-senyawa hidrokarbon aromatik, maka bentonit tersebut perlu diaktivasi terlebih dahulu baik dengan pemanasan atau pengasaman.

BE mempunyai karakteristik dapat menyerap sedikit air, daya tukar ion yang cukup besar, cepat mengendap tanpa membentuk suspensi, dan memiliki pH sekitar 4.0-7.1. BE merupakan tanah liat yang memiliki komposisi utama berupa SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , dan MgO . Komposisi kimia BE dapat dilihat pada Tabel 1. BE termasuk ke dalam Ca-bentonit. Bentonit merupakan istilah yang sering digunakan dalam dunia perdagangan untuk jenis mineral lempung yang mengandung sekitar 80% mineral monmorillonit ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$). Bentonit mempunyai sifat mudah mengembang di dalam air, yang disebabkan oleh pergantian isomer pada lapisan oktohedral (ion Mg oleh ion Al) sehingga dapat mengimbangi kelebihan muatan pada ujung kisinya. Gaya elektrolisis yang mengikat kristal dengan jarak 4.5 \AA dari permukaan unit dapat menjaga unit-unit tersebut tidak saling merapat satu sama lain. Adanya proses pencampuran bentonit dengan air, mengakibatkan terjadinya proses pengembangan, sehingga jarak antara setiap unit makin melebar dan lapisan unit berubah bentuk menjadi serpihan dan mempunyai permukaan yang luas jika terdapat di dalam zat peng suspensi. Hal-hal tersebut yang menyebabkan bentonit dapat digunakan sebagai *bleaching agent* atau adsorben. Bentonit mempunyai sifat mengadsorpsi, karena memiliki ukuran partikel koloid yang sangat kecil dan mempunyai kapasitas permukaan yang tinggi.

Tabel 1. Karakteristik kimia SBE (% berat)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO
79.80	8.70	1.90	3.20	0.7
56.90	9.24	8.27	4.32	3.9
37.45	8.01	0.83	1.28	0.78
65-75	15-20	2.00	2.50	0.50

Proses pemucatan CPO dengan menggunakan adsorben BE berhubungan dengan daya adsorpsi. Daya adsorpsi disebabkan oleh karena BE memiliki pori dalam jumlah besar dan proses adsorpsi akan terjadi karena adanya perbedaan energi potensial antara BE dengan zat yang akan diserap. Penyerapan terhadap warna akan lebih efektif jika adsorben (BE) tersebut memiliki bobot jenis yang rendah, ukuran partikel halus, dan pH mendekati netral. Jumlah adsorben BE yang digunakan pada proses *bleaching* CPO berkisar 0.6–2.0%. Konsentrasi BE yang digunakan di dalam proses *bleaching* sekitar 1-2% b/b minyak, namun apabila minyak yang dikehendaki berwarna putih atau kuning pucat, maka konsentrasi BE bisa ditingkatkan menjadi 3-5% b/b minyak. BE merupakan adsorben yang sangat baik untuk pemucatan minyak nabati karena BE lebih efektif dalam menyerap warna hijau berupa klorofil. Selain itu, residu CPO yang tersimpan dalam BE lebih sedikit jika dibandingkan dengan menggunakan adsorben arang aktif. Selama proses *bleaching*, warna BE berubah menjadi kecokelatan dari yang semula berwarna putih. Selain itu, proses *bleaching* juga mengakibatkan perubahan pada partikel BE. Partikel-partikel BE sangat halus, namun sebagian besar berbentuk tidak beraturan dan keropos. Setelah proses *bleaching*, permukaan partikel menjadi halus akibat adanya kandungan minyak yang terserap pada BE. Luas permukaan spesifik juga mengalami peningkatan volume pori total sekitar 165 $\mu\text{L/g}$. Setelah proses *bleaching*, tahapan berikutnya yaitu penyaringan (filtrasi).

Filtrasi merupakan proses penyaringan *bleached palm oil* (BPO) dari hasil gum yang sudah terikat dengan asam fosfat dan absorben bekas pakai. Tujuan proses filtrasi dilakukan untuk menangkap beberapa partikel BE dari penyaringan pertama, sehingga warna minyak menjadi lebih bening (oranye terang). Selain itu, proses filtrasi juga penting mengingat keberadaan partikel BE di minyak dapat mengurangi *Oxidative Stability Refined Bleach Deodorized* (RBD) oil. Proses penyaringan dilakukan dengan *leaf filter* atau dikenal juga dengan nama Niagara filter. Niagara filter merupakan salah satu jenis mesin filtrasi dengan menggunakan filter yang berbentuk daun (*leaf*) dan dilapisi dengan membran semipermeabel sebagai *filter cloth*. BPO akan mengalir melalui celah *leaf filter* yang disusun secara seri dan turun ke bawah tangki terkumpul pada pipa kolektor minyak dalam bentuk BPO. *Spent earth* akan melekat di permukaan *leaf filter*. Selama proses filtrasi pada niagara, temperatur harus dijaga antara 80- 120 °C agar proses filtrasi berjalan efektif.

Tahapan terakhir dari proses *physical refining method* adalah deodorisasi.. *Preated oil* hasil dari proses *degumming* dan *bleaching*, selanjutnya dilakukan proses aerasi dan dipanaskan pada suhu 240-270 °C pada kondisi vakum (2-5 mmHg) dengan *heat exchanger* sebelum dimasukkan ke dalam deodorizer. Suhu proses di atas 270 °C harus dihindari untuk mengurangi kehilangan minyak netral, *tocopherols/tocotrienols*, dan kemungkinan isomerisasi dan reaksi yang tak diinginkan. Asam lemak bebas yang masih terdapat dalam *preteated oil*, didestilasi bersama dengan senyawa *odoriferous* yang bersifat lebih volatil. Dengan adanya proses tersebut, produk oksidasi seperti aldehid dan keton yang dapat menimbulkan bau dan rasa yang tidak diinginkan pada minyak dapat diminimalisir dan residu karotenoid juga akan terdekomposisi. Suhu tinggi dan tekanan vakum yang digunakan pada proses deodorisasi menyebabkan komponen-komponen yang menimbulkan bau akan mudah diuapkan, dan selanjutnya komponen-komponen tersebut

dipisahkan dari minyak melalui aliran uap. Beberapa komponen yang dapat menimbulkan rasa dan bau menyimpang pada minyak antara lain aldehida, keton, hidrokarbon dan minyak esensial yang jumlahnya sekitar 0.1% dari berat minyak. Komponen tersebut akan semakin mudah untuk diuapkan apabila *relative volatility* yang semakin besar atau konsentrasi komponen yang semakin kecil. Produk akhir proses tersebut berupa *light-colored (bland RBD oil)*. Minyak panas hasil deodorasi pada umumnya dikontakkan pada *heat exchanger* dengan *Pre-treated Oil* pada suhu 120-150 °C untuk memaksimalkan *recovery* energi panas. Tahapan proses selanjutnya yaitu pendinginan yang dilakukan dengan air hingga suhu 55-65 °C sebelum disimpan ke *storage tank* (penyimpanan).

Proses *refinery* juga dapat dilakukan dengan *chemical refining method*. Proses *chemical refining* dimulai dengan tahapan *Gum Conditioning (Degumming)* dan *Neutralization*. CPO akan dipanaskan sampai dengan suhu 80-90 °C. Asam fosfat pada konsentrasi 80-85% ditambahkan sekitar 0,05- 0,2% dari laju umpan CPO. *Degummed oil* selanjutnya dinetralisasi dengan penambahan 20% larutan soda kaustik (NaOH) pada kondisi *excess* (berdasarkan kandungan ALB dalam CPO). *Neutralized palm oil (NPO)* selanjutnya dicuci dengan 10-20% air panas untuk menghilangkan sisa sabun yang terbentuk. Setelah proses tersebut, *washed oil* kemudian dipisahkan dari sabun melalui proses sentrifugasi dan kemudian dikeringkan menggunakan pengering vakum hingga kadar air produk kurang dari 0,05%. **NPO** selanjutnya dilakukan proses *bleaching and filtration*. Proses *bleaching* pada *chemical refining method* memiliki perlakuan yang sama seperti pada *physical refining*, yakni sama-sama menggunakan *bleaching earth*. *Neutralized and bleached oil (NBO)* selanjutnya dialirkan menuju deodorizer dengan teknik yang sama seperti pada *physical refining method*. Minyak selanjutnya didestilasi dengan metode *direct steam injection* pada suhu 240- 260 °C dan tekanan vakum 2-5 mmHg. Kondisi proses tersebut menyebabkan penghilangan residual ALB, *volatile oxidation product*, dan

odoriferous material, serta penguraian karotenoid akibat panas. Produk akhir dari proses berupa *neutralized, bleached, deodorized palm oil* (NBDPO) selanjutnya didinginkan sampai dengan suhu 60 °C dan dilewatkan menuju *polishing filter bag* sebelum dipompakan ke dalam tangki penyimpanan.

IV.

SPENT BLEACHING EARTH (SBE)

Proses *bleaching* pada pemurnian (*refinery process*) CPO selain menghasilkan produk utama berupa *bleached palm oil* (BPO), juga menghasilkan limbah padat berupa *spent bleaching earth* (SBE). SBE merupakan limbah terbesar yang dihasilkan oleh industri *refinery* minyak sawit dan oleokimia. Kapasitas *refinery* minyak sawit pada umumnya berkisar 600 ton sampai 2.500 ton/hari, dan dengan asumsi penggunaan *bleaching earth* sebesar 1%-2% pada proses pemurnian, maka rata-rata akan dihasilkan SBE sebanyak 6-50 ton/hari. Hilirisasi CPO yang terus ditingkatkan juga bisa memberikan dampak berupa peningkatan jumlah SBE. Data jumlah limbah SBE di Indonesia dari tahun ke tahun dapat dilihat pada Tabel 2. Beberapa provinsi di Indonesia terdapat industri *refinery* CPO, sehingga provinsi tersebut juga berkontribusi menghasilkan SBE setiap tahunnya. Data produksi SBE beberapa provinsi di Indonesia pada tahun 2021 terdapat pada Tabel 3.

Tabel 2. Data jumlah limbah SBE

Tahun	Jumlah SBE (Ton)
2017	184.162,02
2018	637.475,81
2019	778.894,22
2021	778.886,79
2022 (September)	456.027,69

Sumber : Ditjen PSLB3, 2020

SBE yang berasal dari proses *bleaching* terdiri atas campuran *bleaching earth*, senyawa organik yang berasal dari CPO seperti trigliserida (*fat*), serta komponen organik dalam jumlah relatif kecil seperti digliserida, asam lemak bebas (ALB), protein, zat warna alami, dan wax. Selain itu, SBE juga masih mengandung komponen asam fosfat. Asam fosfat tersebut berasal dari proses *degumming* yang terbawa oleh CPO ke tahapan proses *bleaching*. Limbah SBE pada umumnya mengandung 20-40% (b/b) sisa minyak, pigmen, produk-produk oksidasi, asam lemak bebas, fosfatida, dan logam-logam dalam jumlah sangat kecil. Konsentrasi komponen utama dan karakteristik kimia (mass%) dari SBE terdapat pada Tabel 4 dan 5.

Tabel 3. Data produksi SBE beberapa provinsi di Indonesia Tahun 2021

Provinsi	Jumlah SBE (Ton)
Lampung	24.805,46
Riau	201.872,11
Sumatera Utara	156.257,05
Jawa Timur	208.569,22
DKI Jakarta	31.878,70
Sumatera Selatan	11.875,11

Sumber : Ditjen PSLB3, 2020

Tabel 4. Konsentrasi komponen utama Spent Bleaching Earth (SBE)

Elemen	Konsentrasi	Referensi
Protein^a	1.32	Wang et al. (2010)
Total Nitrogen^a	0.25 ; 0.06	Ho et al. (2010); Loh et al. (2015)
Organic Matter^a	31.25 ; 30.00	Wang et al. (2010); Loh et al. (2015)
Organic Carbon^a	12.40 ; 15.30 ; 15.40 ; 22.41	Ho et al. (2010); Croker et al. (2004); Loh et al. (2015)
Carbon/Nitrogen (C/N)	128 ; 290-293	Ho et al. (2010); Loh et al. (2013); Loh et al. (2015)
Phosporus (mg/kg)	59, 486 ; 2.36 ^a (P ₂ O ₅)	Wang et al. (2010); Croker et al. (2004); Loh et al. (2015)
Exchangeable Ca (cmol_c/kg)	14.6 ; 3.58 ^a	Croker et al. (2004); Loh et al. (2015)
Exchangeable Mg (cmol_c/kg)	8.6 ; 1.55 ^a	Croker et al. (2004); Loh et al. (2015)
Exchangeable K (cmol_c/kg)	0.7 ; 0.27 ^a	Croker et al. (2004); Loh et al. (2015)
Exchangeable Na (cmol_c/kg)	1.9	Croker et al. (2004)
SO₂	1.32 ^a	Loh et al. (2013)

^asatuan dalam %

Tabel 5. Karakteristik Kimia Spent Bleaching Earth (SBE) (% berat)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Referensi
79.80	8.70	1.90	3.20	0.7	Lara and Park (2004)
56.90	9.24	8.27	4.32	3.9	Loh et al. (2013)
37.45	8.01	0.83	1.28	0.78	Mana et al. (2011)
65-75	15-20	2.00	2.50	0.50	Weng and Pan (2007)

Sumber : Loh et al. (2017)

Limbah SBE yang keluar dari unit *refinery* dengan temperatur 80-120 °C bisa menyebabkan terjadinya reaksi oksidasi apabila kontak dengan oksigen pada udara. Reaksi oksidasi tersebut akan memicu timbulnya panas sehingga berpotensi terjadinya proses kebakaran dengan sendirinya (*self ignition*). SBE yang mengandung jumlah minyak dengan konsentrasi yang tinggi dan dapat terjadi *self ignition*, menyebabkan SBE dikategorikan sebagai bahan yang berpotensi menimbulkan *fire hazard*. Hal tersebut yang menyebabkan SBE diklasifikasikan sebagai limbah berbahaya di banyak negara, dan dilarang dibuang ke *landfill* oleh *EU Landfill Directive* karena memiliki sifat mudah terbakar dan kandungan organik tinggi yang melebihi batas kriteria penerimaan yakni sekitar 6%. Dampak utama SBE terhadap lingkungan adalah pencemaran tanah dan air. SBE yang mengandung senyawa-senyawa kimia berbahaya (ALB, fenol, dan logam berat seperti timbal (Pb) dan kadmium (Cd) dapat merusak tanah dan merusak kualitas air jika dibuang sembarangan. Selain masalah lingkungan, SBE juga dapat menimbulkan masalah kesehatan bagi manusia dan hewan. Jika terhirup atau tertelan, senyawa kimia berbahaya yang terkandung pada SBE dapat memengaruhi sistem saraf, pernapasan, dan pencernaan.

Regulasi terkait pengelolaan SBE terus diperketat dalam beberapa tahun terakhir untuk memastikan bahwa pengolahan limbah industri pengolahan minyak sawit dilakukan dengan cara yang aman bagi lingkungan dan kesehatan masyarakat. Regulasi pada tingkat internasional yang mengatur pengelolaan SBE, salah satunya *Basel Convention on the Control of Transboundary Movements of Hazardous Wastes and their Disposal*. Konvensi tersebut menetapkan kewajiban bagi negara-negara peserta konvensi untuk mengendalikan pergerakan limbah berbahaya, termasuk SBE, dan menetapkan standar untuk metode pengelolannya. Regulasi pengelolaan SBE di tingkat nasional diatur dalam beberapa undang-undang dan peraturan pemerintah, seperti

Undang-Undang No. 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup dan Peraturan Pemerintah No. 101 Tahun 2014 tentang Pengelolaan Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun (B3). Peraturan Pemerintah Nomor 101 Tahun 2014 menetapkan SBE termasuk dalam kategori limbah B3 dengan kode limbah B413, dengan sumber limbah berasal dari proses industri *oleochemical* dan/atau pengolahan minyak hewani atau nabati dengan kategori bahaya 2 (limbah B3 kategori 2 merupakan limbah B3 yang mengandung B3, memiliki efek tunda (*delay effect*), dan berdampak tidak langsung terhadap manusia dan lingkungan hidup serta memiliki toksisitas sub-kronis atau kronis). Penetapan kategori SBE sebagai limbah B3 pada PP 101/2014, bukan disebabkan SBE mengandung logam berat atau bahan beracun berbahaya, tetapi didasarkan pada Konvensi Basel yang menyatakan pengkategorian SBE sebagai limbah B3 karena memiliki kuantitas yang besar dan berpotensi terjadi “*self-combustion*” karena mengandung sekitar 22-30 % residu minyak.

Namun, keputusan status limbah SBE yang bertahun-tahun dikategorikan sebagai limbah B3 mengalami perubahan. Keputusan tersebut terdapat pada Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup Lampiran XIV. Peraturan pemerintah tersebut menyebutkan SBE kini dikategorikan sebagai limbah non-B3 dengan kode N108 dengan poin yang tertulis berupa “Proses industri *oleochemical* dan/atau pengolahan minyak hewani atau nabati yang menghasilkan SBE hasil ekstraksi (SBE Ekstraksi) dengan kandungan minyak kurang dari atau sama dengan 3%“. Poin tersebut menyatakan bahwa apabila kandungan minyak pada SBE lebih dari 3%, maka SBE tersebut tetap masuk ke dalam daftar limbah B3 dari Sumber Spesifik Khusus dengan kode B413. Selain undang-undang dan peraturan di atas, pemerintah juga telah mengeluarkan sejumlah kebijakan dan panduan teknis terkait pengelolaan SBE, seperti Keputusan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan No. 25 Tahun

2016 tentang Pedoman Pengelolaan SBE dan Keputusan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan No. 8 Tahun 2017 tentang Penetapan Batas Ambang Kandungan Logam Berat pada SBE. Kebijakan yang telah disusun bertujuan untuk mengatur dan memastikan bahwa pengolahan SBE dilakukan dengan cara yang aman dan terstandarisasi. Dengan adanya perubahan status SBE sebagai limbah non B3 pada PP 22/2021 membawa harapan besar bagi investor untuk mengembangkan industri pengolahan SBE di daerah sentra industri *refinery* minyak sawit. Industri pengolahan SBE akan menciptakan *multiplier effect* dan memberikan manfaat ekonomi yang semakin besar, seperti peningkatan nilai tambah dari limbah, peningkatan pendapatan, dan penyerapan tenaga kerja. Sebanyak 22 unit *Solvent Extraction Plant* (SEP) yang dibangun di Indonesia dengan nilai investasi mencapai Rp1,8 triliun dapat menyerap 1.100 tenaga kerja langsung. Dampak selanjutnya dari pengembangan industri pengolahan SBE yakni peluang industri sawit (industri *refinery* sampai industri hilir) untuk menjadi *green industry* karena berhasil melaksanakan prinsip *zero waste* dalam proses produksinya akan tercapai. Hal tersebut akan meningkatkan daya saing dan citra industri minyak sawit Indonesia. Data penanganan dan pemanfaatan SBE serta data pengelolaan limbah SBE terdapat pada Tabel 6 dan 7.

Tabel 6. Data penanganan dan pemanfaatan SBE

Tahun	Disimpan di TPS	Dimanfaatkan		Diolah	Ditimbun	Didumping	Lainnya
		Bahan Bakar	Bahan Baku Baku				
2017	72.606,63	6.133,27	89586.1030	2591.4630	961.4200	21.7700	12261.3590
2018	185.478,12	14.044,15	327824.6117	5095.8200	57174.1014	226.6200	47632.3850
2019	377.525,13	25436.9790	222027.3560	23256.8800	74576.0300	3058.7000	53013.1420
2020	10.453,46	5743.4900	20721.5730	2069.1800	0,0000	0,0000	1622.5500

Sumber : Ditjen PSLB3, 2020

Tabel 7. Data Pengelolaan Limbah SBE

Tahun	Dikelola Sendiri	Dikelola Pihak Ketiga	Disimpan di TPS
2017	29343.6010	82211.7840	72606.6300
2018	190211.3711	261438.7360	185478.1239
2019	179804.2200	221564.8670	377525.1318
2020	5216.8100	24939.9830	10453.4557

Sumber : Ditjen PSLB3, 2020

TEKNOLOGI PENGELOLAAN DAN PEMANFAATAN SPENT BLEACHING EARTH (SBE)

Limbah *spent bleaching earth* (SBE) yang dikategorikan sebagai limbah bahan berbahaya dan beracun (B3) perlu dikelola agar tidak menimbulkan pencemaran lingkungan. Pengelolaan limbah B3 merupakan rangkaian proses dalam menangani limbah B3 yang dilakukan menggunakan prinsip minimalisasi limbah, pengolahan dan pendayagunaan kembali limbah, serta pembuangan atau pemusnahan akhir B3 di *landfill*. Pengelolaan limbah B3 meliputi pengurangan, penyimpanan, pengangkutan, pengolahan, pemanfaatan, dan penimbunan. Pengolahan limbah B3 yang merupakan bagian dari pengelolaan limbah B3 dapat dilakukan dengan beberapa teknologi proses, seperti stabilisasi, *thermal process*, solidifikasi secara fisika, kimia, maupun biologi dengan metode teknologi bersih atau ramah lingkungan. Proses pengolahan limbah B3 bertujuan untuk menjadikan limbah menjadi tidak berbahaya atau berkurang daya racunnya. Setelah dilakukan proses pengolahan, limbah B3 masih memerlukan metode pembuangan yang khusus dan tepat untuk mencegah resiko terjadi pencemaran. Pengelolaan limbah saat ini didasarkan pada konsep *circular economy*, dengan mendorong limbah B3 agar didaur ulang atau dimanfaatkan menjadi sumber daya proses produksi, baik

bahan baku maupun energi. Konsep *circular economy* dianggap lebih berkelanjutan karena ramah lingkungan dengan mengurangi beban lingkungan dan meningkatkan kualitas lingkungan hidup. Selain itu, *circular economy* juga dapat meningkatkan nilai tambah ekonomi, menyediakan lapangan kerja, berkontribusi pada pembangunan, serta berperan dalam mengatasi perubahan iklim.

Kandungan minyak yang tinggi yang terdapat pada SBE, sekitar 20-40% dapat menyebabkan masalah, namun juga dapat juga menjadi potensi yang dapat memberikan keuntungan. Kandungan minyak SBE yang tinggi dapat diekstrak untuk menghasilkan *high acid crude palm oil* (HACPO) yang apabila diproses lebih lanjut dapat digunakan sebagai bahan baku produk oleokimia dan biodiesel. Minyak yang dihasilkan dari proses *recovery* tidak *food grade* karena mengandung asam lemak bebas (ALB) yang tinggi. Selain minyak, komponen padat SBE juga dapat diolah dan dimanfaatkan. Komponen padat SBE tersusun atas mineral montmorillonit yang stabil, sehingga SBE dapat *direcovery* dan diaktifkan kembali menjadi *reactivated bleaching earth* (RBE), yang daya adsorpsi nya sama dengan *bleaching earth* baru (*new bleaching earth* = NBE). Pemanfaatan SBE sebagai bahan baku untuk bahan baku industri bukan hanya dapat mengurangi SBE yang akan dibuang ke *landfill*, tetapi juga dapat mengurangi penggalian bahan tambang bentonit. Selain hal tersebut, mengambil kembali minyak yang terdapat pada SBE dan kemudian memanfaatkannya untuk memproduksi biodiesel atau produk oleokimia, maka dapat meningkatkan produksi biodiesel dan oleokimia tanpa mengurangi ketersediaan CPO untuk pangan dan tentunya dapat mencegah pencemaran lingkungan yang diakibatkan oleh minyak. Selain untuk biodiesel dan produk oleokimia, SBE juga dapat diproses menjadi produk lainnya, seperti untuk campuran pupuk organik, campuran pakan ternak, atau sebagai campuran bahan bakar untuk menghasilkan panas.

5.1 Pengelolaan dengan metode *landfill*

Limbah SBE yang dihasilkan dari proses *refinery* CPO terdiri atas campuran *bleaching earth* (BE) dan senyawa organik yang berasal dari CPO. Senyawa organik pada SBE yang berasal dari CPO sebagian besar terdiri dari senyawa trigliserida dan komponen organik lainnya, seperti digliserida, asam lemak bebas (ALB), protein, zat warna alami, dan lilin. Selain itu SBE mengandung asam fosfat yang berasal dari proses *degumming* yang terbawa minyak ke unit *bleaching*. Komponen kimia anorganik utama SBE terdiri atas SiO_2 , Al_2O_3 , MgO , Fe_2O_3 dan CaO , sedangkan kandungan unsurnya tersusun atas C, Ca, O, Fe, Mg, Al, Si, P dan K. Si dan Al merupakan konstituen utama SBE sedangkan Fe dan Mg merupakan elemen minor dalam *interlayers oktahedral* dan *tetrahedral*. Jika dilihat dari komposisi tersebut, SBE mengandung bahan anorganik turunan dari BE dan bahan organik yang berasal dari CPO, serta tidak mengandung bahan-bahan berbahaya seperti logam-logam berat dan bahan-bahan beracun, sehingga cara termudah dan termurah untuk penanganan SBE adalah dengan dibuang (*dumping*) di lahan (*landfill*).

Hal yang harus diperhatikan apabila SBE dilakukan proses *dumping* ke *landfill* tanpa perlakuan terlebih dahulu adalah kandungan minyak yang relatif tinggi, yakni sekitar 20-40%. Kandungan minyak yang tinggi tersebut akan menyebabkan terjadinya proses oksidasi sehingga menghasilkan komponen volatil yang bisa menimbulkan aroma tengik dan menurunkan pH tanah, yang berdampak pada penurunan kualitas tanah. Kandungan minyak dan bahan organik lain yang terdapat pada SBE juga dapat dengan cepat teroksidasi ke titik autoignisi spontan akibat proses autokatalisis dari mineral lempung. Ketika SBE meninggalkan proses *refining*, proses oksidasi minyak akan terjadi sesegera mungkin akibat adanya kontak dengan oksigen yang terdapat di atmosfer. Hal tersebut kemudian dikatalisis dengan adanya luas permukaan yang tinggi. Reaksi oksidasi tersebut menyebabkan SBE mengalami

proses *self-heat* dan dapat terbakar secara spontan, sehingga menyebabkan potensi bahaya kebakaran. Berdasarkan hal tersebut, SBE dikategorikan sebagai limbah B3 dan dilarang dibuang ke *landfill* oleh *EU Landfill Directive* karena memiliki sifat mudah terbakar dan mengandung bahan organik yang melebihi batas kriteria penerimaan yakni sekitar 6%. Tabel 8 menunjukkan *material safety data sheet* (MSDS) untuk BE, CPO, dan ALB. Tabel tersebut memperlihatkan sifat fisiko-kimia dan tingkat bahaya dari BE, CPO, dan ALB yang ditunjukkan dalam *Hazardous Materials Identification System* (HMIS) dan *National Fire Protection Association* (NFPA) Rating.

Tabel 8 menunjukkan bahwa SBE tersusun dari sebagian besar dari bahan-bahan masuk dalam golongan tidak berbahaya, seperti masing-masing *ignition/flash point* dari CPO dan ALB 343°C dan 170°C, serta bersifat tidak *auto-ignition*. Tabel 8 juga menunjukkan bahwa berdasarkan *Hazardous Material Identification System* dan *National Fire Protection Association Ratings*, nilai *flammability* CPO dan ALB adalah 1 (satu), yang berarti bahwa bahan tersebut harus dipanaskan terlebih dahulu sebelum terjadi proses penyalaan (terbakar), termasuk bahan *solid*, *liquid*, dan *semi solid* yang memiliki titik nyala di atas 93°C. Tabel 8 juga menyatakan bahwa jika ditinjau dari faktor kesehatan (*health*), SBE dan CPO memiliki nilai (nol) yang berarti tidak ada resiko kesehatan yang signifikan, kecuali nilai kesehatan ALB sebesar 1 (satu), yang berarti terdapat potensi yang dapat menyebabkan iritasi atau cedera ringan. *Reactivity rating* dari SBE, CPO, dan ALB pun memiliki adalah 0 (nol), yang berarti bahwa bahan-bahan tersebut pada umumnya bersifat stabil meskipun dalam kondisi terbakar, dan tidak akan bereaksi dengan air, terpolimerisasi, terurai, mengembun, atau bereaksi sendiri, dan bisa dinyatakan sebagai bukan bahan peledak. *Personal Protection Index* (PPI) pada Tabel 8 juga menunjukkan bahwa CPO dan ALB mempunyai kode A, yang berarti pekerja yang menangani bahan diwajibkan menggunakan kaca mata (pelindung mata), sedangkan PPI BE adalah X, yang berarti bahwa perlu adanya

konsultasi dengan supervisor atau perlu adanya penanganan khusus dalam menangani bahan.

European Commision menjelaskan bahwa limbah B3 merupakan limbah yang memenuhi satu atau lebih dari lima belas sifat berbahaya yang tercantum pada Lampiran III Peraturan Komisi Eropa (EC) No. 1357/2014, yang dikeluarkan pada tanggal 18 Desember 2014. Peraturan tersebut menjelaskan tata cara menilai apakah suatu limbah dapat dinyatakan berbahaya atau tidak, seperti harus mengumpulkan data tentang komposisi dan sifat limbah terlebih dahulu, misalkan a) pengetahuan tentang limbah dan proses asal-usul limbah, b) analisis limbah (analisis kimia, uji fisik, *biotest*), dan c) perhitungan persen komposisi senyawa atau komponen yang tergolong berbahaya. Data-data tersebut selanjutnya digunakan sebagai panduan dalam memilih dan mengklasifikasikan limbah apakah termasuk ke dalam 15 jenis limbah berbahaya atau tidak. Menurut *European Commision*, limbah yang menunjukkan setidaknya satu sifat (*properties*) berbahaya di antara 15 *Hazardous Properties/HP*, maka limbah tersebut dapat diklasifikasikan sebagai limbah B3. Namun sebaliknya,, apabila limbah tidak mempunyai sifat salah satu dari 15 HP tersebut, maka limbah tersebut dapat digolongkan sebagai bukan limbah B3. Pengujian menyeluruh dan bertingkat terhadap semua 15 sifat limbah berbahaya diperlukan untuk menentukan limbah termasuk golongan limbah B3 atau tidak. *Publication Office of the EU* (2014) menyatakan bahwa limbah dapat diklasifikasikan sebagai bukan limbah B3 (*non hazardous waste*), apabila limbah tersebut harus lolos uji 15 sifat limbah berbahaya.

Tabel 8 Sifat fisiko-kimia dan HMIS/NFPA Rating BE, CPO, dan ALB

Parameter	<i>Bleaching Earth</i>	CPO	ALB
Bentuk (pada 25°C)	padat	Cair-semi padat	Cair
pH	7-8	n.a	5-7
Titik bakar/ <i>flash point</i> (oC)	n.a	343	170
<i>Auto-ignition</i>	n.a	Tidak	Tidak
Tekanan uap (mmHg)	n.a	0,1 (30°C)	92,3 (25°C)
Kelarutan dalam air	Tidak larut	Tidak larut	Tidak larut
Kestabilan bahan	stabil	Stabil	Stabil
Polimerisasi bahan beracun	tidak	Tidak	Tidak
HMIS/NFPA Rating			
Kesehatan	0	0	1
<i>Flammability</i>	0	1	1
<i>Reactivity</i>	0	0	0
<i>Personal Protection Index</i>	X	A	A

Sumber: MSDSOnline, 2013

Masyarakat Eropa mengklasifikasikan SBE tidak termasuk dalam limbah B3, namun dikategorikan sebagai limbah yang apabila akan *didumping* harus mengikuti peraturan yang telah ditentukan agar tidak mencemari lingkungan. *Unites States Environmental Protection Agency* (USEPA) menyatakan limbah padat dapat tergolong sebagai limbah B3 apabila secara spesifik diketahui atau memenuhi karakteristik limbah B3. Karakteristik limbah B3 yakni

sifat yang menunjukkan bahwa limbah tersebut cukup mengancam sehingga layak diatur sebagai limbah berbahaya. USEPA juga menetapkan empat karakteristik limbah berbahaya, yaitu:

- a) Mudah terbakar (*ignitability*). Limbah dinyatakan berbahaya apabila memiliki karakteristik yang mudah terbakar, seperti cairan yang mempunyai titik nyala pada suhu kurang 60°C, padatan yang dapat terbakar pada kondisi tertentu, dan gas terkompresi dan pengoksidasi yang dapat menyala. EPA menetapkan D001 sebagai kode limbah untuk limbah berbahaya yang dapat terbakar.
- b) Korosivitas (*corrosivity*). Limbah dinyatakan berbahaya apabila memiliki sifat korosi, seperti limbah cair dengan pH kurang dari atau sama dengan 2 atau pH lebih besar atau sama dengan 12,5 atau limbah yang dapat menyebabkan korosi pada baja. EPA menetapkan D002 sebagai kode limbah untuk limbah berbahaya korosif.
- c) Reaktivitas (*reactivity*). Limbah dinyatakan berbahaya apabila memiliki reaktivitas yang tidak stabil pada kondisi normal, dapat bereaksi dengan air, dapat mengeluarkan gas beracun, atau dapat meledak dalam kondisi normal atau saat dipanaskan. EPA menetapkan D003 sebagai kode limbah untuk limbah berbahaya reaktif.
- d) Toksisitas (*toxicity*). Limbah dinyatakan berbahaya apabila memiliki karakteristik toksisitas yang berbahaya jika tertelan, terserap, atau terhirup. Limbah yang mengandung racun dapat menimbulkan kekhawatiran, karena berpotensi dapat terlepas dari limbah, dan kemudian dapat mencemari air, tanah, dan air tanah. Toksisitas limbah ditentukan oleh *Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) (SW-846 Test Method 1311)*. EPA menetapkan kode limbah D004 hingga D043 yang sesuai dengan kontaminan dan konsentrasi TCLP yang terkait (USEPA, 2020a). USEPA menetapkan bahwa SBE bukan limbah berbahaya (B3), tetapi limbah yang kalau ingin

dibuang (*dumping*) harus mengikuti aturan yang berlaku, yaitu Title 40 CFR Part 261 (USEPA, 2020b). *United States Department of Transportation* (USDOT) telah mengeluarkan peraturan yang mengatur pengangkutan SBE yang dikenal sebagai Title 49 CFR Part 172, yang menggolongkan SBE sebagai padatan yang mudah terbakar, sehingga perlakuan untuk pengangkutannya harus mengikuti kriteria limbah tersebut.

Pencegahan SBE agar tidak mudah teroksidasi, tersulut (*ignite*), dan terbakar penting untuk dilakukan untuk mencegah SBE kontak dengan udara dan oksigen. Berdasarkan hal tersebut, salah satu cara untuk melakukan proses *dumping* SBE adalah dengan menggunakan metode *Sanitary Landfill*, yakni dengan menutup atau melapisi permukaan SBE dengan pasir atau tanah, sehingga kontak dengan udara dan oksigen dapat diminimalisir dan pembakaran spontan dapat dicegah. Untuk mengurangi penyalaan SBE pada *landfill*, air dapat dialirkan atau disemprotkan pada permukaan *landfill*. Berbagai metode dapat dilakukan untuk menstabilkan SBE, salah satunya dengan mencampurkan SBE dengan bubuk batu kapur (kalsium karbonat) sebanyak 5-7%, yang bertujuan untuk menekan pembakaran spontan. Campuran tersebut selanjutnya dapat dicampur dengan bahan pakan ternak atau disebarakan pada lahan pertanian (*farmland*).

5.2 Dibuang ke Lahan Pertanian (*Farmland*)

Proses *dumping* pada lahan pertanian (*farmland*) merupakan salah satu alternatif pengelolaan limbah SBE, karena beberapa penelitian menunjukkan bahwa 60-90% minyak akan terdegradasi oleh bakteri tanah pada rentang waktu sekitar 6 bulan. Proses degradasi tersebut akan meningkat apabila dilakukan pada tanah berpasir dengan penambahan pupuk dengan kondisi iklim hangat. Tanaman yang ditumbuhkan pada tanah yang ditambahkan dengan

SBE akan tumbuh normal. Selain itu, penambahan SBE juga memperbaiki retensi air tanah. Berbagai penelitian terkait penggunaan limbah tanah liat dan bentonit daur ulang baik dalam bentuk asalnya atau dikomposkan dengan sekam padi, abu sekam padi, kotoran ayam, dan biomassa lainnya untuk memperbaiki kondisi tanah telah dilakukan. Sebagai contoh, *Acid Waste Bentonit (AWS)* yang merupakan limbah berbasis bentonit kaya organik yang dihasilkan dari proses penjernihan anggur, akan dicampurkan ke dalam tanah asam untuk memfasilitasi adanya interaksi tanah-tanaman untuk meningkatkan kesuburan tanah, peremajaan mikroba, dan produktivitas biomassa. Bagian permukaan minyak yang memiliki muatan negatif juga bermanfaat, misalkan dapat mengikat logam-logam berat dan pestisida, sehingga dapat mengurangi terjadinya proses *leaching* yang berpotensi mengkontaminasi saluran air.

Limbah SBE juga berpotensi dikembangkan sebagai *bio-fertilizer*. *Bio-fertilizer* yang diproduksi selama ini pada industri sawit berfokus pada pemanfaatan limbah padat, seperti tandan kosong kelapa sawit (TKKS), cangkang, maupun *fiber*. Pemanfaatan SBE sebagai *bio-fertilizer* jarang sekali dilakukan, padahal limbah tersebut mengandung cukup banyak komponen yang dibutuhkan oleh tanah, seperti Nitrogen, Phosphor, dan Kalium (NPK). Tabel 9 menunjukkan perbandingan komposisi kandungan SBE dengan biomassa lain. *Bleaching earth* dan SBE yang memiliki karakteristik seperti zeolite, juga mempunyai komponen mineral serta komponen yang bermanfaat, seperti Si dan Na, yang dapat digunakan sebagai nutrisi untuk pertumbuhan tanaman. Tabel 10 menunjukkan karakteristik dari *bleaching earth*, *spent bleaching earth*, dan *zeolite*. SBE juga mengandung bahan organik dari residu CPO yang mengandung asam lemak C14-C18 dan *phytonutrients*, seperti β -carotene dan vitamin E, seperti yang terdapat pada Tabel 11.

Tabel 9. Kandungan NPK dalam SBE dibandingkan dengan sumber biomassa lain

Komponen	N (%)	P (%)	K (%)	C:N
<i>Spent bleaching earth</i> (SBE)	0.06–0.71	2.01–2.36	0.27–0.84	290.00
Batang Sawit	0.19	0.07	1.21	155.00
Tandan kosong kelapa sawit	0.33	0.03	1.59	50–94
Pelepah kelapa sawit	0.55	0.03	2.00	48–61
Sabut kelapa sawit	0.80	0.10	0.50	57.00
Air limbah (<i>Palm Oil Mill Effluent/POME</i>)	4.68	1.25	5.16	8.00
Kotoran ayam	1.08	2.22	2.25	7.00

Sumber: Loh et al., 2013.

Tabel 10. Karakteristik *bleaching earth*, *spent bleaching earth*, dan zeolite

Karakteristik	BE baru ^{a)}	SBE	Zeolit ^{b)}
Kadar air bebas (%)	10,5	0–1,8	6,9
pH (20% suspensi)	4,6	4.5–5,3	6,0–7,0
Komposisi kimia abu (% oksida b/b)			
SiO ₂	60,4	56,9	71
Al ₂ O ₃	11,5	9,24	11
Fe ₂ O ₃	9,3	8,27	1,61
MgO	5,2	4,32	1,01
CaO	1,7	3,9	2,51
Na ₂ O	0,4	0,08	1,70
K ₂ O	1,2	0,96	2,28
MnO ₂	NA	0,10	0,05
TiO ₂	NA	0,90	0,30
P ₂ O ₅	NA	4,87	0,05

^{a)} Taiko Supreme 1B supplied by Taiko Clay Marketing Sdn. Bhd. (2006).

^{b)} Bionas Zeolite, national fertilizer for Bionas Bio-diesel Project.

NA: not applicable.

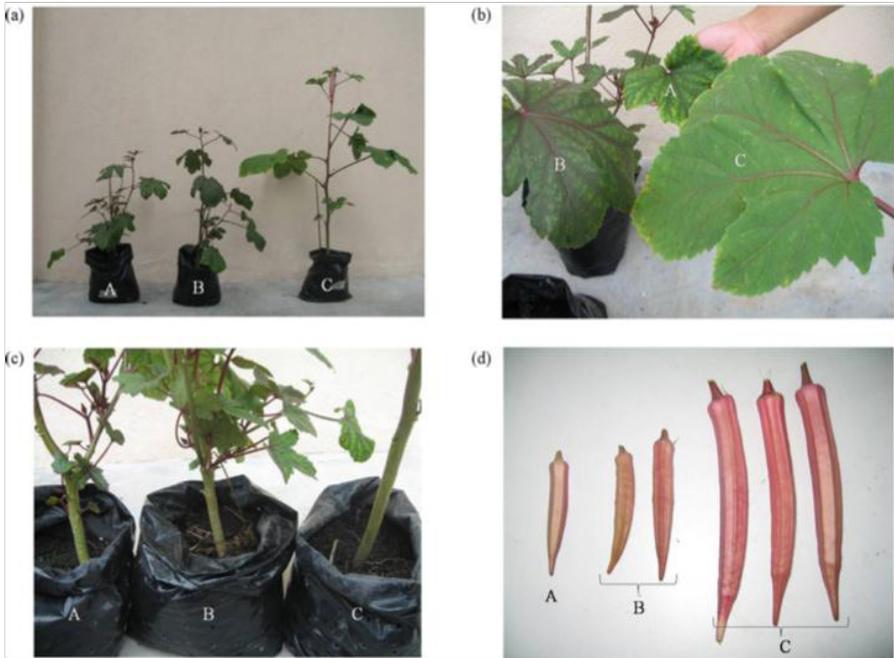
Komponen-komponen yang terkandung pada SBE berpotensi dalam pertumbuhan tanaman dan menyediakan nutrient yang baik untuk pertumbuhan mikroorganisme tanah, seperti kandungan P_2O_5 yang berdampak positif terhadap pertumbuhan bunga dan buah; N dan Mg yang dapat berperan pada pertumbuhan daun, dan K yang dapat berfungsi dalam mengkatalisis proses fotosintesis. Ketersediaan komponen-komponen tersebut sangat dibutuhkan dalam berbagai jenis dan bentuk pupuk. Berbagai hasil penelitian yang telah dilakukan diketahui bahwa hampir semua komponen yang terdapat pada SBE dapat berguna dalam pertumbuhan tanaman, walaupun tidak pada tingkat yang optimum (Loh et al., 2013).

Tabel 11. Karakteristik residu minyak dalam *spent bleaching earth* (SBE)

Karakteristik	SBE
Karakteristik residu minyak	
Asam lemak bebas, FFA (%)	12,6
Bilangan peroksida, PV (meq/kg)	3,4
Phosphorous, P (mg/kg)	18,7
Besi, Fe (mg/kg)	1,24
Tembaga, Cu (mg/kg)	0,38
β -carotene (mg/kg)	6
Vitamin E (mg/kg)	38,8
Komposisi asam lemak (% b/b sebagai metil ester)	
C14:0	1,0
C16:0	44,4
C18:0	4,7
C18:1	39,4
C18:2	10,5

Dengan berbagai komponen yang dimiliki oleh SBE untuk pertumbuhan tanaman, pengaplikasian SBE untuk *farmland* bukan tanpa kendala. SBE mempunyai rasio C/N sangat tinggi, yakni berkisar 290, karena mengandung karbon (C) dalam jumlah besar dan nitrogen (N) yang terbatas. Hal tersebut dapat menyebabkan dekomposisi SBE akan berjalan sangat lambat, sehingga apabila SBE ditambahkan langsung ke tanah dapat menyebabkan kerusakan tanah akibat kekurangan unsur nitrogen yang diperlukan untuk pertumbuhan tanaman. Permasalahan lainnya yakni SBE memiliki pH asam (4,5-5,3), kapasitas jerap air (*water holding capacity*) hanya sekitar 6,1 ml/100, serta bersifat hidrofobik akibat adanya kandungan minyak yang terdapat dalam SBE, sehingga kurang cocok apabila diaplikasikan langsung ke lahan tanpa *treatment*. Salah satu *treatment* untuk mengatasi permasalahan tersebut yakni proses *Co-composting*. Proses *co-composting* dilakukan untuk dapat meningkatkan pH akibat pembentukan komponen alkali selama proses pengomposan. Selama proses berlangsung, pH dari SBE-based *bio-organic* dapat meningkat menjadi 5,4-6,5. Selain itu, *water holding capacity* juga mengalami peningkatan menjadi 14-20 ml/100g, sehingga sifat hidrofobik juga dapat mengalami penurunan akibat hadirnya komponen bahan organik. Kapasitas tukar kation (KTK) juga mengalami peningkatan dari 8,03 cmol/kg menjadi 31,5-36 cmol/kg. Selama proses pengomposan, juga terjadi penurunan nilai C/N rasio menjadi 9-21. Proses *co-composting* dapat dilakukan dengan penambahan bahan organik lain yang kaya akan sumber nitrogen, seperti limbah dari pabrik kelapa sawit dan kotoran ternak. Produk dari hasil *co-composting* dikenal dengan SBE-based *bio-organic*.

Berbagai penelitian tentang pengaplikasian SBE-based *bio-organic* pada tanaman telah banyak dilakukan, salah satunya pada tanaman okra (*Abelmoschus esculentus*). Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa penambahan SBE-based *bio-organic* pada tanah dapat memengaruhi pertumbuhan tanaman Okra (Gambar 6).



Gambar 6. Perbandingan kinerja pertumbuhan tanaman Okra [(a) tinggi tanaman, (b) ukuran daun, (c) diameter batang dan (d) ukuran buah] pada perlakuan pemupukan yang berbeda (A) kontrol, (B) kotoran ayam dan (c) kompos dari SBE (*SBE-based bio-organic*), setelah percobaan lapangan selama 3 bulan (Sumber: Loh *et al.*, 2013).

Pengaplikasian SBE pada lahan pertanian (*farmland*) apabila dilakukan dengan teknik yang tepat, maka dapat memberikan berbagai manfaat bagi tanah dan lingkungan. *SBE-based bio-organic* dapat berperan sebagai sumber unsur hara N, P dan K serta sebagai agen pengubah perbaikan struktur tanah atau perbaikan tanah yang terdegradasi. Berbagai komponen hara dimiliki dan ditambah dengan KTK yang tinggi serta kandungan C organik yang juga tinggi, maka proses pelepasan unsur hara ionik (baik makro maupun mikro) akan terjadi secara perlahan sehingga dapat ketersediaan hara untuk memelihara tanaman selama masa pertumbuhan cukup banyak. KTK tanah yang meningkat juga dapat memberikan peluang untuk

pengelolaan kesuburan tanah jangka panjang. Selain itu, SBE dari proses *refinery* juga tidak mengandung logam berat, sehingga tidak akan mengkontaminasi tanah. Pengaplikasian SBE-based *bio-organic* juga dapat menghemat biaya dalam pengelolaan hara tanah. Namun, dengan berbagai kelebihan yang ada, terutama pada karakteristik fisikokimia tanah dan produktivitas tanaman.. Evaluasi tersebut dibutuhkan untuk memastikan efisiensi penggunaan hara/pupuk sehingga pengelolaan pupuk dapat dikontrol dan lebih efisien. Kondisi dan sifat fisikokimia tanah dapat berubah apabila perubahan cuaca terjadi secara tiba-tiba dan berdampak parah, seperti kekeringan, banjir atau musim hujan yang ekstrim, sehingga evaluasi terkait hal tersebut penting juga untuk dilakukan.

5.3. Pemanfaatan SBE sebagai campuran pupuk

Seperti yang telah diuraikan di atas, limbah SBE memiliki makronutrien esensial dalam jumlah yang cukup banyak seperti N, P, K, Ca, Mg dan S, yang dapat berfungsi untuk pertumbuhan tanaman, sehingga SBE berpotensi digunakan sebagai pupuk. Namun, proses pengaplikasian SBE secara langsung ke lahan harus dihindari dan harus dilakukan proses *pre-treatment* terlebih dahulu. Kandungan bahan organik yang tinggi pada SBE dapat meningkatkan kapasitas tukar kation (KTK). Kapasitas tukar kation SBE pada *edible oil* sebesar 37-40 cmol/kg dan pada *palm oil* sekitar 31.50-36.0 cmol_c/kg. Selain itu, pengaplikasian SBE dapat meningkatkan *water holding capacity*, serta memberikan sifat pelepasan nutrisi secara perlahan, sehingga semua nutrisi dari pupuk/air akan terserap ke tanaman dengan cara pelepasan nutrisi secara terkontrol dan efisien serta logam-logam berat dapat teradsorpsi. Hal tersebut menunjukkan bahwa pengaplikasian SBE yang sudah di-*treatment* pada tanah dapat berperan dalam pengelolaan kesuburan dan polusi tanah jangka panjang. Limbah SBE dari proses *refinery* minyak juga mengandung beberapa mikronutrient, seperti Cu sebesar 7,30 mg/kg, Fe sebesar 5.94-9.76 mg/kg, dan Zn sebesar 18.8 mg/kg,

yang sangat penting untuk pertumbuhan tanaman. SBE dalam lingkungan isomorfiknya mampu menukar kation antara permukaan struktur internal dan sumber eksternal sehingga menciptakan afinitas tinggi terhadap kation eksternal. Karakteristik tersebut dapat memperlambat kemampuan pelepasan unsur hara untuk penyerapan dan mampu memberikan daya tahan terhadap *leachate*, sehingga dapat meningkatkan produktivitas tanaman.

Dengan segala kelebihan yang ada, limbah SBE memiliki kekurangan, yakni mempunyai sifat hidrofobik yang tinggi sehingga dapat menghasilkan sifat *water-repellency* air yang tinggi. Sifat *water-repellent* diketahui setingkat di atas *water-resistant*, sehingga SBE memiliki sifat tahan air sampai ke tingkatan hidrofobik. Hal tersebut terjadi disebabkan SBE mengandung konsentrasi residu minyak yang cukup tinggi. Selain itu, SBE juga dapat menyebabkan ketidakseimbangan pasokan hara tanaman, terutama pada unsur nitrogen (N) dan kalium (K). Sifat SBE yang asam juga dapat menjadi kendala terhadap pemanfaatannya sebagai pupuk bio-organik tanpa campuran pada lahan pertanian. Beberapa kelemahan tersebut dapat diminimalisir dengan proses *co-composting*. Limbah SBE apabila dilakukan dengan substrat organik lainnya seperti sekam padi, serasah ayam dan limbah padat kelapa sawit dapat memberikan efek sinergis dalam produksi pupuk. Limbah SBE apabila dikomposkan bersama sekam padi, abu sekam padi, dan kotoran ayam memberikan efek positif, seperti meningkatkan nutrisi dan berpengaruh terhadap kondisi tanah, serta keasaman dan hidrofobisitas tanah juga dapat berkurang akibat keberadaan mikroorganisme yang mampu menguraikan dan mengisolasi minyak. Hal-hal tersebut yang mendasari SBE yang sudah mengalami proses *co-composting* dengan bahan organik lain lebih disukai sebagai agen pembenah tanah. Sebagai agen pembenah tanah, beberapa faktor yang penting untuk diperhatikan yakni mengendalikan degradasi tanah, meningkatkan interaksi udara dan air tanah, drainase tanah dan agregasi tanah, serta mengurangi pengerasan dan pemadatan

tanah dan sebagainya. Penambahan agen pembenah tanah dapat memengaruhi beberapa sifat tanah, seperti daya ikat air, aerasi, temperatur, populasi dan perilaku mikroorganisme, kapasitas dan ketersediaan hara, kapasitas tukar kation, stabilitas struktur dan agregat tanah, bahan kimia organik, serta hewan yang terdapat pada tanah.

SBE yang akan diaplikasikan ke tanah harus bebas dari logam berat atau setidaknya konsentrasi logam berat yang terkandung di dalamnya seminimal mungkin. Beberapa penelitian menunjukkan kandungan beberapa logam berat dalam SBE seperti Cd, Cr, Ni dan Pb memiliki konsentrasi yang jauh lebih rendah dibandingkan dengan batas konsentrasi polutan maksimum yang ditetapkan oleh US-EPA untuk pengaplikasian bahan ke lahan. Logam berat yang terkandung di dalam SBE terdapat pada Tabel 12.

Proses *co-composting* SBE dengan penambahan biomassa dan sekam padi diketahui dapat meningkatkan imobilitas logam berat sehingga dapat mengurangi resiko *phytotoxicity*. Selain itu, beberapa hasil penelitian juga menunjukkan bahwa pemberian pembenah tanah berupa *co-composting* SBE mampu meningkatkan pH tanah sehingga kondisi lingkungan bagi kehidupan dan perkembangan mikroorganisme tanah menjadi lebih baik bagi pertumbuhan tanaman. Penggunaan SBE yang telah dikomposkan sebagai campuran pupuk juga telah banyak dilakukan. Beberapa hasil penelitian menunjukkan bahwa SBE yang telah dikomposkan memiliki dampak positif baik untuk pertumbuhan tanaman, karakteristik fisik tanah, maupun perkembangbiakan mikroorganisme tanah. Hal tersebut ditandai dengan meningkatnya jumlah elemen mineral, karbon organik, kapasitas tukar kation (KTK), *water holding capacity*, dan juga mampu menurunkan C/N rasio. Penelitian pengaplikasian SBE dalam campuran pupuk juga menunjukkan adanya efek positif bagi beberapa tanaman, misalkan terjadinya peningkatan yang sangat signifikan pada produktivitas okra (*Abelmoschus esculentus*), kangkung (*Ipomoea aquatic*) dan kacang

tanah. Peningkatan tersebut terjadi sebesar 35-60%. Pengomposan SBE dilakukan selama 90 hari dengan campuran 25% kotoran ayam dan 40% limbah pabrik kelapa sawit seperti tandan kosong kelapa sawit (TKKS), air limbah pabrik kelapa sawit (ALPKS), dan cacahan pelepah sawit. Rasio campuran yang digunakan tergantung pada kandungan NPK yang terdapat pada masing-masing bahan. Tanaman lain yang sudah diteliti yakni jagung hibrida (*Zea mays L.*). Respon biokimia tanaman tersebut terhadap penggunaan campuran pupuk NPK, 5% SBE, dan 5% DSBE (*De-oiled Spent Bleaching Earth*) pada skala lapang menunjukkan bahwa tidak terdapat respon biokimia yang mengganggu sehingga tidak berpotensi menurunkan produksi jagung. DSBE juga berpotensi untuk digunakan sebagai material tambahan dalam produksi pupuk NPK.

Selain sebagai campuran pupuk, SBE juga bisa digunakan sebagai *filler*/bahan pengisi dan bahan *anti-caking* pupuk NPK, seperti yang sudah dilakukan oleh Wilmar Group Indonesia bekerjasama dengan Universitas Gajah Mada. Penelitian tersebut didasarkan pada karakteristik kandungan mineral yang terdapat pada SBE relatif sama dengan *white clay* dan *brown clay* yang pada umumnya digunakan sebagai *filler*/bahan pengisi dan bahan *anti-caking* pupuk NPK. Sumber N dalam yang biasanya terdapat pada NPK merupakan urea yang sangat mudah menyerap air (higroskopis) sehingga apabila tidak ditambahkan bahan *anti caking* akan menyebabkan penggumpalan pupuk selama penyimpanan. *Bleaching earth* dapat digunakan sebagai *anti-caking* pupuk NPK karena mengandung senyawa Si yang tinggi sehingga dapat menyerap air dari udara lembab. Kandungan Al_2O_3 yang terdapat pada *bleaching earth* juga dapat berfungsi sebagai *granulating agen* dan bahan pengisi. Tabel 13 menunjukkan kandungan oksida mineral pada *bleaching earth*, *white clay local*, dan *brown clay* dan gambar 7 menunjukkan pupuk NPK berbasis *brown clay* dan SBE. Gambar 7 memperlihatkan bahwa tidak terlihat adanya perbedaan antara granula pupuk NPK yang diberi tambahan SBE dan *brown clay*.

Tabel 12. Kandungan logam berat yang terkandung di *Spent Bleaching Earth*

Logam berat	SBE ^a	SBE ^b	China ^b	European Union ^b	France ^b	Italy ^b	Holland ^b	Belgium ^b
Cadmium	0.11	0.26	3	20-40	2	20	1.25	1
Lead	6.37	12.9	100	750-1200	100	750	100	50
Mercury	-	0.82	5	16-25	1	10	0.75	1
Arsenic	-	1.65	30	-	-	-	15	-
Chromium	6.28	8.03	300	1000-1500	150	-	75	100

^aHo et al. (2010)

^bWang et al. (2010)

Sumber : Loh et al. (2017)

Tabel 13. Kandungan oksida mineral pada BE, *white clay local*, dan *brown clay*

Komponen	Satuan	<i>Bleaching Earth</i>	<i>White clay</i>	<i>Brown clay</i>
SiO ₂	%	67,50	68,55	41,99
Al ₂ O ₃	%	12,50	25,33	25,14
Fe ₂ O ₃	%	6,00	0,10	15,44
MgO	%	4,00	0,09	0,27
CaO	%	2,50	0,07	0,86
Na ₂ O	%	1,00	0,22	0,61
K ₂ O	%	1,00	0,02	1,02
Lainnya	%	5,50	5,62	5,62

Sumber: Wilmar Group Indonesia (2020)



(a) Brown clay

(b) SBE

Gambar 7. Pupuk NPK yang menggunakan (a) *brown clay* dan (b) SBE (Wilmar Group Indonesia, 2020)

Limbah SBE yang dimanfaatkan sebagai *filler* dan bahan *anti-caking* pupuk NPK berdampak positif dalam penurunan konsentrasi beberapa logam berat, seperti Cd (dari 4-5 ppm menjadi tidak terdeteksi), Cr (dari 40 ppm menjadi sekitar 20 ppm) dan Zn (dari 100-200 ppm menjadi berkisar 50 ppm). Selain itu, beberapa hasil penelitian menunjukkan bahwa residu logam berat pada media tanam yang dipupuk dengan campuran NPK dan SBE sama dengan media tanam yang dipupuk dengan campuran NPK dan *brown clay* (NPK komersial). Pengaplikasian SBE sebagai *banner* pupuk NPK juga diketahui tidak menyebabkan terjadinya gangguan keseimbangan hara mineral pada media tanam. Wilmar Group Indonesia meneliti jagung hibrida yang ditanam pada skala *polybag* dengan penambahan NPK berbasis SBE 5%. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa tidak terdapat gangguan pada aktifitas metabolis, fisiologis, pertumbuhan, dan produktifitas, bahkan terdapat kecenderungan bahwa semua karakter tumbuhnya menjadi lebih baik jika dibandingkan dengan tanaman jagung hibrida dan kedelai yang dipupuk NPK berbasis *brown clay* 10%. Hasil uji coba lapang dan rumah kaca pada beberapa penelitian juga menunjukkan bahwa beberapa tanaman, seperti kubis China (*Brassica chinensis*), jamur Shiitake (*Lentinula edodes*), ryegrass Italia (*Lolium*

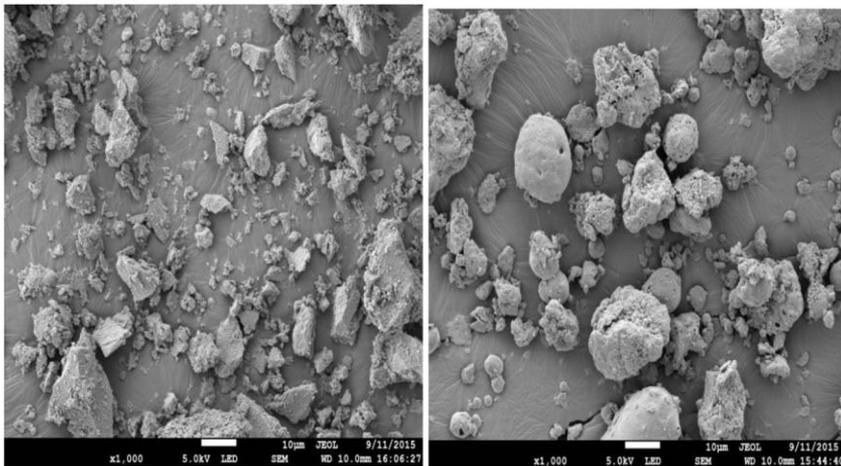
multiflorum), jagung (*Zea mays* L.), sorgum (*Sorgum bicolor*), kangkung (*Ipomoea aquatic*), okra (*A. esculentus*), terong (*Solanum melongena* var. *esculenta* L) dan berbagai jenis kacang tanah telah memanfaatkan unsur makro dan mikro yang terkandung dalam SBE untuk pertumbuhannya.

5.4 Pemanfaatan SBE sebagai campuran bahan konstruksi

Limbah SBE tersusun dari beberapa komposisi kimia yang didominasi senyawa SiO_2 sekitar 83,05%. Senyawa SiO_2 yang dikenal sebagai debu silika dapat menyebabkan penyakit silikosis, apabila terlalu sering dihirup oleh pekerja. Silikosis (*miner's phthisis*, *grinder's asthma*, *potter's rot*) merupakan salah satu jenis penyakit paru akibat terhirup SiO_2 secara kronik yang ditandai dengan adanya inflamasi dan pembentukan jaringan parut dari lesi nodular pada lobus paru bagian atas. Namun, SiO_2 berpotensi digunakan sebagai campuran bahan konstruksi. Limbah SBE dapat dimanfaatkan sebagai material bangunan seperti bata tanpa pembakaran dan hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa SBE dapat menggantikan hingga 25% pasir pada pembuatan bata tanpa pembakaran dengan komposisi material pasir, semen, tanah laterit, dan SBE. Penelitian lain juga menggunakan SBE sebagai material dalam pembuatan bata beton dan hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa SBE dapat digunakan untuk menggantikan agregat halus hingga 50% dengan kekuatan tidak kurang dari 2,5 MPa dan mampu memenuhi persyaratan kekuatan bata beton oleh SNI 03-0349-1989. Limbah SBE juga dapat digunakan sebagai salah satu komponen penyusun semen Portland.

Penelitian terkait penambahan *Processed Spent Bleaching Earth* (PSBE) untuk mengurangi penggunaan semen terhadap kekuatan kompresi beton ringan telah dilakukan. PSBE merupakan produk akhir dari hasil proses pengambilan kembali minyak yang terkandung pada SBE. Proses pengembalian kembali minyak dari SBE menyebabkan lapisan silika mengalami perubahan bentuk dari

bentuk awalnya berbentuk *crystalline* menjadi bentuk tak beraturan (*amorphous*) yang mempunyai sifat *pozzolanic* sangat baik/superior. Gambar 8 menunjukkan perbedaan foto *Scanning Electron Microscope* (SEM) dari permukaan semen portland dan PSBE. Penambahan PSBE untuk menggantikan semen sebanyak 10-40% juga telah dilakukan. PSBE diketahui mempunyai sifat *pozzolanic* sangat baik. Hal tersebut yang diduga dapat menyebabkan peningkatan kekuatan tekan dari beton ringan. Gambar 9 memperlihatkan kekuatan tekan dari semen Portland (*Ordinary Portland Cement/OPC*) tanpa penambahan *Foam* dan *Foamed Cement* (FC) yang menggunakan penambahan *foam* sebagai kontrol, dibandingkan dengan FC yang menggunakan penambahan PSBE. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penambahan PSBE dapat meningkatkan secara signifikan kuat tekan beton/bata ringan dibandingkan dengan beton/bata ringan (FC) yang tanpa penambahan PSBE. Gambar 9 juga menunjukkan bahwa substitusi semen dengan penggunaan 30% PSBE dapat memberikan kekuatan tekan paling besar dan menghasilkan beton/bata ringan dengan karakteristik lebih baik dibandingkan kontrol (FC).

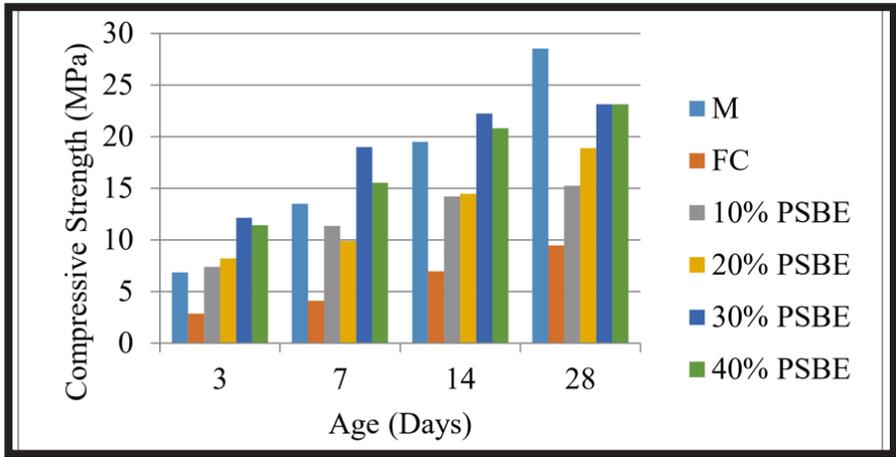


(a) Semen Portland

(b) PSBE

Gambar 8. SEM permukaan semen portland dan PSBE

(Rokiah et al., 2019)



Gambar 9. Kekuatan tekan beton ringan: kontrol M (100%OPC tanpa foam), FC (100% OPC dengan foam) dan FC dengan penggunaan 10-40% Processed Spent Bleaching Earth (PSBE) (Rokiah et al., 2019)

5.5. Pemanfaatan SBE sebagai campuran bahan bakar

Limbah SBE dapat dimanfaatkan sebagai campuran bahan bakar. Limbah tersebut dapat digunakan sebagai bahan bakar tingkat rendah untuk pembangkit listrik dan panas. SBE diperkirakan mengandung nilai kalor sekitar 11.900 hingga 15.800 kJ/kg. SBE dapat digunakan sebagai campuran dengan batubara dengan persentase yang cukup tinggi untuk dijadikan bahan bakar *power house.*, dimana batubara yang dihasilkan memiliki kualitas cukup bagus dan hasil emisinya juga memenuhi baku mutu. Beberapa penelitian juga menunjukkan bahwa SBE bernilai kalor tinggi dan dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar dalam berbagai jenis campuran berbentuk briket. Limbah SBE yang diolah oleh PT. Semen Baturaja (Persero) Tbk memiliki nilai kalori sebesar 2400 – 2600 kkal/kg yang cukup untuk digunakan sebagai bahan bakar alternatif.

Limbah SBE jika digunakan sebagai bahan bakar alternatif akan meninggalkan abu (*ash*) dalam bentuk mineral anorganik yang akan bercampur dengan umpan pada proses pembakaran dalam mesin *rotary kiln*. Hal tersebut dapat mempengaruhi kualitas *clinker* yang dihasilkan dikarenakan komposisi bahan baku umpan mesin *rotary kiln* sudah diatur pada tahap penggilingan bahan mentah produk *raw meal*, sehingga penggunaan limbah SBE sebagai bahan bakar alternatif tidak boleh mengganggu operasional mesin *rotary kiln* dan mengurangi kualitas *clinker* yang dihasilkan. Penggunaan limbah SBE sebagai bahan bakar alternatif dapat menurunkan konsumsi panas spesifik atau *Specific Fuel Consumption* (SFC) pada operasional mesin *rotary kiln* dalam proses pembuatan *clinker* di pabrik semen. Konsumsi panas spesifik pada produksi semen akan semakin mengecil apabila semakin banyak menggunakan bahan bakar alternatif, hal tersebut dikarenakan penggunaan bahan bakar alternatif akan menurunkan emisi gas karbonmonoksida.

Limbah SBE juga diketahui dapat dijadikan sebagai bahan di pembangkit listrik tenaga biogas. Penelitian terkait hal tersebut telah dilakukan, dengan skema terdapat dua konsorsium yang bekerja sama dalam menghasilkan listrik, yakni konsorsium petani sebagai pemasok pupuk kandang dan industri *refinery* minyak sebagai pemasok SBE. Kedua kelompok tersebut membentuk perusahaan induk yang akan menjalankan pembangkit listrik tenaga biogas. Produk dari teknologi tersebut berupa listrik (dari kogenerasi) atau biogas dan pupuk hayati yang berasal dari fermentasi campuran pupuk kandang dengan SBE. Teknologi tersebut selain dapat mengurangi jumlah limbah SBE, juga dapat memberikan manfaat ekonomi dengan menghasilkan produk yang dapat dijual.

5.6. Regenerasi dan Daur Ulang SBE

Proses regenerasi dan daur ulang limbah merupakan salah satu kegiatan minimisasi limbah. Minimisasi limbah merupakan proses yang bertujuan untuk menghasilkan pengurangan limbah sebelum limbah tersebut diolah atau dibuang. *Bleaching earth* (BE) merupakan sumber daya alam yang tidak terbarukan, sehingga regenerasi SBE akan menghemat konsumsi BE. Regenerasi SBE dan pemulihan sisa minyak yang terkandung pada SBE telah menjadi fokus penelitian yang dilakukan oleh peneliti dan industri minyak nabati selama hampir 50 tahun. Berbagai metode regenerasi SBE telah diteliti dan dilakukan, seperti metode uap, metode alkali, ekstraksi pelarut, dan dengan metode perlakuan termal. Beberapa metode untuk regenerasi SBE, yakni:

a) Pirolisis.

Pirolisis merupakan proses dekomposisi termokimia senyawa organik tanpa kehadiran oksigen atau udara untuk menghasilkan berbagai padatan kaya karbon. Limbah SBE yang telah diregenerasi sebagai adsorben secara pirolisis dapat diaktivasi dengan cara dipanaskan pada suhu 800°C selama 2 jam, sambil dialiri gas nitrogen (N₂) dengan laju 0,3L/menit dan gas karbondioksida (CO₂) dengan laju 0,3L/menit. Hasil proses tersebut menunjukkan bahwa SBE yang diregenerasi dapat digunakan sebagai adsorben berbiaya rendah untuk menghilangkan pestisida kationik (misalnya, paraquat) dari perairan dan dapat mengadsorpsi beberapa ion logam berat, seperti Cu (II), Pb (II), dan Cd (II). Berdasarkan hal tersebut, proses pirolisis memberikan lebih banyak peluang untuk daur ulang SBE dengan mengubahnya menjadi produk yang berguna.

b) Karbonisasi hidrotermal.

Karbonisasi hidrotermal merupakan proses kimia berkelanjutan. Proses kimia berkelanjutan bertujuan untuk meningkatkan nilai tambah bahan kimia yang tidak terlalu

berbahaya menjadi produk berkualitas tinggi dengan cara yang ramah lingkungan dari sumber daya terbarukan. Perlakuan hidrotermal adalah mencampur limbah dengan zat organik seperti sakarida (glukosa, sukrosa, atau pati) atau senyawa yang lebih sederhana seperti furfural kemudian dipanaskan pada 150–350°C pada tekanan autogenous, untuk menghasilkan produk organik yang kaya akan karbon dan bersifat larut dalam air. Teknologi tersebut dikenal dengan teknologi *Hydrothermal carbonization/HTC*. Teknologi tersebut dapat dilakukan untuk mengolah SBE yang semula dianggap sebagai limbah dan bernilai rendah menjadi berbagai bahan organik yang memiliki nilai dan kaya akan karbon. Bahan organik tersebut dapat diaplikasikan sebagai adsorben atau katalis. Kondisi proses teknologi HTC berkisar 180–250°C pada tekanan subkritik dengan waktu tinggal yang relatif pendek. Teknologi HTC merupakan teknologi alternatif yang ramah lingkungan dan berkelanjutan untuk mengubah biomassa atau limbah, seperti SBE, menjadi produk yang berguna pada suhu sedang tanpa menggunakan surfaktan atau katalis berbahaya.

c) Ekstraksi pelarut

Ekstraksi pelarut merupakan metode yang umum digunakan untuk meregenerasi SBE dengan mengeluarkan sisa minyak dan bahan organik lainnya. Baik pelarut polutan maupun nonpolar dapat digunakan sebagai bahan untuk ekstraksi, tergantung pada jenis minyak yang ingin diekstraksi. Pelarut polar seperti aseton, metil etil keton, perkloroetilen, metilen klorida, isopropil alkohol, dan kloroform sering digunakan dalam proses ekstraksi komponen polar dan zat pewarna yang terkandung di dalam SBE. Pelarut nonpolar seperti petroleum eter, petroleum benzena, xilena, toluena, dan heksana sering digunakan untuk mengekstraksi fraksi nonpolar seperti trigliserida serta komponen nonpolar lainnya. Jenis pelarut,

metode ekstraksi, dan kondisi proses saat ekstraksi akan menentukan kualitas minyak yang diekstraksi dari SBE. Pelarut organik (metanol, toluena, benzena, xilena, karbon tetraklorida, dan aseton) sering dipakai dalam menghilangkan minyak SBE. Di antara pelarut organik lainnya, metanol lebih direkomendasikan dalam proses ekstraksi minyak dari SBE, karena biaya proses yang relatif lebih rendah dan tidak berbahaya. Selain itu, kualitas minyak yang dihasilkan juga lebih baik dibandingkan dengan pelarut organik lainnya. SBE yang diolah dapat digunakan sebagai adsorben berbiaya rendah baru untuk menghilangkan Ni (II) dalam perairan, dan ini mendukung pengurangan biaya pembuangan limbah dan menyediakan sorben alternatif (Mahmoud *et al.*, 2012). Selain itu, SBE dapat digunakan sebagai adsorben yang berguna untuk menghilangkan pewarna dasar organik setelah diekstraksi dengan heksana (Lee *et al.*, 1997).

d) Perlakuan kimia

Perlakuan kimia dapat dilakukan dengan dua cara yakni aktivasi asam dan aktivasi basa. Regenerasi SBE dengan aktivasi asam tergolong metode regenerasi SBE berbiaya rendah. Adsorben diproduksi dari SBE dengan metode impregnasi H_2SO_4 yang dapat menghilangkan arsen (III) dalam perairan. Adsorben menghilangkan beta-picoline dalam berbagai kondisi laboratorium. Metode lain untuk regenerasi SBE diaktifkan secara langsung menggunakan larutan basa. Produk regenerasi yang dihasilkan digunakan sebagai adsorben untuk adsorpsi herbisida dalam perairan. Beberapa penelitian menyatakan bahwa SBE hasil regenerasi dengan larutan merupakan adsorben yang menjanjikan, berbiaya rendah, dan relatif efisien untuk menghilangkan fluorida.

e) Metode Kombinasi

Saat ini, proses regenerasi SBE dilakukan dengan mengkombinasikan beberapa metode yang berbeda, dengan untuk untuk menghasilkan *regenerated bleaching earth* (RBE) yang mempunyai daya serap optimum dengan biaya minimal dan efisien, yang juga sejalan dengan tren peningkatan pemanfaatan SBE yang efektif untuk berbagai keperluan, salah satunya dengan proses ekstraksi pelarut yang diikuti dengan proses termal. SBE diekstraksi dengan menggunakan pelarut, seperti etil metil keton (EMK), untuk mendapatkan minyak yang kemudian diolah menjadi menjadi metil ester (biodiesel) melalui proses esterifikasi. SBE yang tersisa selanjutnya dikalsinasi pada suhu 500°C selama 30 menit, dan dapat digunakan kembali untuk adsorben. Metode baru yang sedang dikembangkan adalah metode transesterifikasi in situ. Transesterifikasi in situ adalah proses produksi biodiesel dari SBE secara langsung, tanpa melalui proses ekstraksi Transesterifikasi in situ dan regenerasi panas membantu memulihkan pori-pori tanpa mempengaruhi struktur *bleaching earth*. Penggunaan etil metil keton (EMK) sebagai *co-solvent* dalam proses transesterifikasi menghasilkan RBE dengan kualitas adsorpsi yang lebih baik.

Metode kombinasi lainnya yang dapat dilakukan yakni aktivasi asam diikuti dengan proses termal. Regenerasi SBE umumnya dilakukan dengan impregnasi asam diikuti dengan proses pemanasan. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa proses regenerasi SBE yang optimal menggunakan larutan asam sulfat konsentrasi 10-20% dan pemanasan pada suhu 350°C selama 3 jam, dan menghasilkan RBE yang mampu menyerap ion Cr (VI) dalam perairan dan berbagai pewarna organik terutama pewarna reaktif dan asam, dengan kapasitas penyerapan maksimum 300 mg/g.

Metode kombinasi lainnya yakni dengan menggunakan proses aktivasi garam yang diikuti dengan proses termal dan

perlakuan asam. Proses yang dilaksanakan yakni SBE direndam dalam larutan amonium klorida 3M, dan kemudian dipanaskan pada suhu 400 C selama satu jam diikuti dengan pencucian dengan larutan HCl dingin. Hasil karakterisasi dari proses tersebut menunjukkan bahwa metode regenerasi di atas dapat meningkatkan mikroporositas dalam material yang diregenerasi. Metode kombinasi selanjutnya yang dapat dilakukan yakni aktivasi basa yang diikuti oleh proses termal. SBE diimpregnasi dengan larutan natrium hidoksida (NaOH) diikuti dengan perlakuan termal ringan (suhu 100°C) menunjukan kapasitas yang baik terhadap metil biru (258,4mg/g) dan safranin (555,6mg/g) (Mana et al., 2007).

Aplikasi *regenerated bleaching earth* (RBE):

a) Pengikat logam-logam berat.

Penghilangan ion logam berat pada perairan merupakan salah satu tujuan penelitian dalam penerapan material berbasis SBE untuk dekontaminasi air limbah. Ion logam berat yang dapat dihilangkan dari perairan dengan menggunakan bahan berbasis SBE yang telah diregenerasi adalah Cu (II), Pb (II), Cd (II), Cr (III), Ni (II), dan Cr (VI). Kapasitas adsorpsi SBE yang telah diregenerasi sebagai fungsi dari pH, dosis adsorben, waktu kontak, suhu, dan konsentrasi ion logam awal, isotherm adsorpsi, dan keberadaan anion lainnya. Jumlah adsorpsi ion logam meningkat dengan bertambahnya waktu dan suhu proses .

b) Pengikat polutan organik

Adsorben berbasis SBE juga menunjukkan kapasitas adsorpsi yang tinggi untuk polutan organik. Pewarna organik (*dyes*) yang termasuk dalam polutan organik meliputi: *basic blue 3*, *basic violet 4*, *basic violet 3*, *basic red 9*, *ethyl violet*, *methyl violet*, *acid black 10B*. Kemampuan adsorpsi kontaminan organik ini tergantung pada berbagai metode pengolahan dan struktur

target kontaminan organik. Hasil penelitian lebih lanjut menunjukkan bahwa SBE berkarbonisasi (CSBE) lebih efektif untuk menghilangkan pewarna dasar. Menurut persamaan *Langmuir Isotherm*, kapasitas adsorpsi maksimum CSBE untuk pewarna *basic blue 3* dan *methylene blue* adalah masing-masing 102,6 dan 94,5 mg/g. Oleh karena itu, CSBE dapat digunakan sebagai adsorben untuk menghilangkan pewarna dasar dalam air limbah. SBE regenerasi juga digunakan untuk menghilangkan tiga pewarna dasar (*violet 4*, *violet 3*, dan *red 9*) dari larutan air.

Herbisida dan limbah farmasi merupakan salah satu polutan yang menyebabkan kerusakan parah bagi organisme, ekosistem, dan kesehatan manusia, karena dapat membunuh mikroorganisme dan menyebabkan pembentukan "superbakteri", SBE yang mengandung matriks aluminosilikat dan diregenerasi dengan aktivasi kimia mampu menyerap fenol, 3-klorofenol, dan 2,3-diklorofenol yang merupakan bahan aktif herbisida. Penelitian lebih lanjut menunjukkan bahwa SBE diaktivasi fisik dengan CO₂ dan steam, mempunyai struktur mesopori yang memiliki luas permukaan BET yang tinggi dan memiliki afinitas yang tinggi terhadap paraquat. Berdasarkan hal tersebut, regenerasi limbah agro-industri ini merupakan salah satu pilihan untuk aplikasi pengolahan air untuk menghilangkan kontaminan organik.

SBE yang diaktifkan juga dapat digunakan secara efektif mengolah air limbah yang mengandung 2,4-Asam diklorofenoksiasetat (2,4-D) dan asam ariloksialkanoat yang dikenal sebagai herbisida fenoksi. Herbisida fenoksi adalah salah satu pestisida yang paling banyak digunakan di seluruh dunia, bersifat racun bagi tanaman berdaun lebar, setelah diserap, dipindahkan ke dalam tanaman dan terakumulasi di titik tumbuh akar dan pucuk, selanjutnya menghambat pertumbuhan. SBE yang diregenerasi juga mampu menyerap MCPA (asam 4-kloro-2-metilfenoksiasetat) dan karbamazepin dalam perairan. SBE

yang diregenerasi dengan asam adalah adsorben yang sangat baik untuk menghilangkan piridin dan turunannya (*alpha-picoline*, *gamma-picoline*) dalam air limbah. Piridin dan turunannya merupakan komponen yang mudah menguap, beracun, dan mudah terbakar, dengan bau yang menyengat dan tidak sedap.

c) Pengikat polutan anorganik

Selain logam berat dan kontaminan organik, SBE hasil regenerasi juga mampu menghilangkan polutan anorganik lainnya, seperti ion fluorida dan amonium. Kapasitas adsorpsi ion fluorida maksimum dari SBE hasil regenerasi adalah 0,6 mg/g. Kapasitas adsorpsi SBE hasil regenerasi terhadap fluorida dipengaruhi oleh dosis adsorben, waktu kontak, dan pH. Survei menunjukkan SBE hasil regenerasi memiliki selektivitas yang tinggi terhadap ion amonium, dan efisiensi penghilangan ion amonium mencapai 81% .

d) Pemucat minyak makan

Warna minyak merupakan faktor terpenting untuk nilai komersial minyak di antara kriteria kualitas minyak nabati lainnya. ,Warna tersebut disebabkan oleh pigmen yang terkandung dalam minyak mentah, seperti klorofil- α dan β -karoten. Komponen warna tersebut harus dihilangkan pada tahap proses purifikasi. SBE yang direaktivasi (RBE) mampu menyerap komponen warna pada minyak makan mentah (*crude edible oil*). Hasil penelitian menunjukkan bahwa SBE direaktivasi (RBE) mempunyai efisiensi yang sama dengan *virgin bleaching earth* dalam adsorpsi zat warna. Penelitian lebih lanjut menunjukkan bahwa penggunaan RBE untuk adsorben proses pemurnian minyak tidak menyebabkan perubahan kadar asam lemak bebas, bilangan iod, dan bilangan penyabunan minyak yang dihasilkan.

Hasil kajian beberapa literatur yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa metode regenerasi SBE yang optimal adalah pengolahan termal diikuti dengan aktivasi kimiawi. Aplikasi bahan berbasis SBE regenerasi difokuskan pada fungsi adsorpsi, terutama untuk menghilangkan polutan dari air limbah, seperti pewarna, ion logam berat, pestisida, dan lain-lain. Meskipun regenerasi dan daur ulang SBE telah terbukti sangat berhasil, namun masih banyak aspek yang perlu dikaji, terutama dalam penerapan praktisnya pada skala yang lebih besar.

5.7. Bahan Baku HACPO (*High Acid Crude Palm Oil*)

High Acid Crude Palm Oil (HACPO) adalah hasil produksi CPO yang mempunyai kadar keasaman lebih tinggi. Tingkat keasaman yang tinggi ini disebabkan asam lemak bebas yang dihasilkan dari proses hidrolisis trigliserida yang dikatalis oleh ion-ion pada permukaan pori-pori bentonite. Kadar asam lemak bebas HACPO sekitar 5-30%, jauh lebih rendah dibandingkan dengan kadar asam lemak bebas CPO yaitu maksimal 5%. Minyak sawit mentah berkadar asam tinggi tidak dapat diproses menjadi minyak goreng atau menjadi produk pangan, tetapi dapat dimanfaatkan untuk pakan ternak, industri farmasi, bahan bakar nabati (biodiesel) dan oleokimia. Dengan produksi SBE sekitar 780 ribu ton/tahun pada tahun 2019 dan dengan kandungan minyak 20-45%, maka Indonesia berpotensi untuk mendapatkan tambahan produksi minyak nabati dalam bentuk HACPO antara 150-350 ribu ton. Suatu jumlah yang cukup besar untuk dapat meningkatkan produksi biodiesel dan produk oleokimia nasional tanpa mengurangi konsumsi CPO. Disingkat itu, dengan pengutipan minyak dalam SBE, akan mengurangi bahan pencemaran yang mengkontaminasi lahan dan juga dapat mengurangi emisi gas rumah kaca (GRK).

Minyak dalam SBE biasanya diperoleh kembali dengan ekstraksi pelarut. Tergantung pada aplikasi minyak yang diekstraksi, beberapa pelarut non-polar atau polar dapat digunakan sebagai

media ekstraksi. Pelarut polar seperti aseton, metiletil keton, metilen klorida, perkloretilen, isopropil alkohol, mengekstrak komponen polar dan komponen warna dalam minyak, sedangkan pelarut non-polar seperti petroleum benzena, petroleum eter, toluena, xilena, heksana, mengekstrak fraksi non-polar terutama trigliserida serta komponen non-polar lainnya. Jenis pelarut yang digunakan dan metode ekstraksi minyak menentukan kualitas minyak hasil ekstraksi SBE. Untuk mendapatkan minyak dengan kualitas yang lebih baik, ekstraksi harus dilakukan pada SBE segar. Rendemen minyak yang dihasilkan dari ekstraksi SBE dengan menggunakan berbagai pelarut dapat dilihat pada Tabel 14. Secara umum, jumlah minyak yang dihasilkan dari ekstraksi SBE dengan pelarut polar etanol dan isopropanol 7% lebih tinggi dibandingkan dengan minyak yang diekstrak dengan pelarut nonpolar dan diketahui ekitar 97-98% minyak yang terkandung dalam SBE mampu diekstrak

Tabel 14. Rendemen minyak, asam lemak bebas (FFA), bilangan peroksida (PV), nilai p-Anisidin (AV), dan nilai Totox dari Minyak yang diekstrak dari SBE dengan menggunakan beberapa pelarut.

Pelarut	Rendemen (%)	ALB (%)	Bilangan Peroksida	p-Anisidin Value	Totox ^{*)} Value
Metanol	24,4	17,25	–	39,40	39,40
Etanol	42,4	10,90	–	39,00	39,00
Isopropanol	44,2	8,70	–	39,16	39,16
Petroleumeter	36,6	8,03	2,12	28,87	33,10
Pentana	38,0	8,46	0,59	27,48	28,66
Heksana	37,7	8,11	0,32	28,80	29,44
Heptana	37,6	7,96	0,26	25,50	26,00
CPO	–	3,76	0,82	35,74	37,38

^{*)}Totox Value = 2BP + AV. Sumber: Lee et al. (2000).

Secara umum, warna minyak hasil ekstraksi pelarut polar lebih gelap dibandingkan dengan minyak yang diekstraksi dengan pelarut nonpolar. Peningkatan kuantitas komponen polar yang diekstraksi menggunakan pelarut polar mencakup komponen minor yang ada dalam minyak, seperti fosfatida, asam lemak, dan sterol serta produk teroksidasi, terhidrolisis, dan terpolimerisasi lainnya dari reaksi yang dikatalisis oleh gugus asam pada SBE. Misalnya, ekstrak metanol mengandung 67,9 ppm fosfolipid, dibandingkan dengan 2,4 ppm pada ekstrak heksana, serta konsentrasi asam lemak dan nilai Totox yang jauh lebih tinggi. Meskipun isopropanol dan etanol adalah pelarut yang lebih efisien daripada pelarut lainnya, minyak yang diekstraksi memiliki kualitas yang lebih rendah. Selain itu, rekoveri alkohol untuk digunakan kembali membutuhkan lebih banyak energi karena panas laten penguapannya jauh lebih tinggi daripada pelarut hidrokarbon. Disamping itu, pelarut alkohol membentuk larut dengan air, yang menyebabkan kesulitan dalam rekoverinya. Tetapi, SBE yang diekstrak dengan alkohol menjadi lebih bersih, dengan jumlah bahan pengotor yang lebih rendah dapat diperoleh

Salah satu metode ekstraksi minyak dari SBE yang bisa dilakukan adalah dengan menggunakan metode *supercritical fluid extraction*. Metode *supercritical fluid extraction* memiliki waktu operasional yang lebih cepat jika dibandingkan metode *conventional extraction*. Kelebihan lainnya dari metode *supercritical fluid extraction* adalah tidak meninggalkan residu, merupakan teknologi yang bersih dan ramah lingkungan, memiliki suhu ekstraksi yang rendah, dan memiliki *operational cost* yang rendah. Fluida superkritis mempunyai dua karakteristik *mass transfer* yang utama, yakni *gas-like diffusivities* dan *liquid-like densities*. *Gas-like characteristics* yakni memiliki viskositas rendah, difusivitas yang tinggi, *low surface tension*, dan *high compressibility*. *Liquid-like characteristics* yakni memiliki densitas tinggi, *high solvent power*, dan *good solubility*. Fluida superkritis memiliki temperatur dan

tekanan di bawah titik kritis, seperti CO₂ memiliki Tc 31 °C dan Pc 73,8 bar, ethane memiliki Tc 32,25 °C dan Pc 48,7 bar, methanol memiliki Tc 239,45 °C dan Pc 80,9 bar, n-hexane memiliki Tc 234,35 °C dan Pc 30,2 bar, dan ethanl memiliki Tc 240,75 °C dan Pc 61,4 bar.

Penggunaan CO₂ sebagai solvent dalam metode *supercritical fluid extraction* memiliki beberapa kelebihan, yakni secara komersil tersedia dengan kemurnian tinggi, tidak mengandung residu berbahaya, tidak berbau, tidak berasa, inert, tidka beracun, temperatur proses relative rendah, pemisahan CO₂ dari ekstrak mudah untuk dilakukan, relatif murah, tidak mengandung *solute*, tidak mudah terbakar, dan tidak korosif. Beberapa keuntungan dari *supercritical CO₂ extraction* yaitu kemudahan mengontrol solubility/kelarutan dengan mengatur tekanan dan temperatur, daya larut *solvent* yang tinggi karena memiliki densitas yang hampir sebanding dengan fasa cairnya, viskositas *solvent* yang lebih rendah dari cairan sehingga menghasilkan laju transfer massa yang lebih besar, difusivitas yang lebih besar dari fasa cairnya sehingga memiliki kemampuan untuk penetrasi kedalam solut sehingga ekstraksi lebih baik, serta ompatibel dengan kondisi lingkungan karena bahan yang digunakan tidak berbahaya dan tidak menghasilkan residu. Salah satu hasil penelitian menunjukkan bahwa kondisi operasi optimum yang digunakan untuk memperoleh *yield* ekstrak yang maksimal dengan *flowrate* CO₂ 4 mL/menit adalah pada tekanan 30 MPa, suhu 40 °C, dan konsentrasi *entrainer* etanol 10%, dengan *yield* yang diperoleh sebesar 21,79% dan *recovery* yang didapatkan sebesar 93,52%. SBE yang diperoleh dengan kondisi tersebut dapat digunakan kembali dalam proses *bleaching* setelah diregenerasi.

Metode ekstraksi untuk mendapatkan HACPO lainnya adalah *subcritical water extraction method* (SWM). Teknologi ekstraksi air subkritis (SWEM) telah menarik banyak peneliti karena dianggap lebih ramah lingkungan dibandingkan dengan ekstraksi menggunakan pelarut organik. Proses ekstraksi ini dilakukan pada

titik kritis air, yaitu pada suhu 374°C dan tekanan 22,1 MPa. Pada titik kritis, air dilaporkan memiliki sifat dielektrik rendah dan derajat ionisasi tinggi, sehingga akan lebih banyak dan lebih mudah untuk mengekstraksi zat terlarut. Banyak komponen yang dapat diekstraksi dari berbagai biomassa dapat dengan mudah diekstraksi dalam kondisi ini. Salah satu penelitian dari Jepang melaporkan bahwa sejumlah besar minyak, asam lemak, asam amino, dan asam-asam organik lainnya dapat diekstraksi dari biomassa yang mengandung minyak, seperti limbah ikan, isi perut cumi-cumi, dan limbah daging dengan metode ekstraksi air subkritis. Hasil penelitian lainnya menemukan kondisi ideal untuk mengekstraksi SBE menggunakan metode ekstraksi air subkritis, yaitu pada suhu 270°C, dengan perbandingan bahan dengan pelarut sekitar 1:3, dan waktu ekstraksi 20 menit.

Aqueous extraction adalah metode paling murah dibandingkan dengan metode lainnya untuk mendapatkan minyak yang tertahan dalam SBE. Metode-metode *aqueous extraction* yang dapat diaplikasikan pada SBE adalah *steam blowing*, sirkulasi air panas, dan perebusan SBE dalam air yang mengandung soda dan garam. Tetapi mutu minyak yang rendah dan hanya sesuai digunakan untuk tujuan teknis, seperti campuran pakan ternak. Pengutipan minyak dari SBE adalah solusi unik untuk masalah lingkungan, sebelum SBE tersebut dibuang ke tempat pembuangan akhir (*landfill*) ataupun untuk diproses lebih lanjut. Minyak yang dihasilkan dapat menggantikan minyak bumi untuk diproses lebih lanjut menjadi bahan pelumas yang aman dan tidak beracun yang digunakan pada industri makanan dan serta ramah lingkungan. Selain itu, minyak dari SBE dapat menjadi bahan baku produksi biodiesel yang ekonomis. Pengambilan minyak sisa dan penggunaan kembali SBE menawarkan potensi penghematan biaya yang besar bagi industri pengolahan minyak sawit.

5.8. Bahan Baku Industri Biodiesel dan Oleokimia

Beberapa hasil penelitian menunjukkan bahwa skenario pemanfaatan SBE yang paling optimal adalah skenario penggunaan minyak nabati (HACPO) dari SBE untuk produksi biodiesel dan pemanfaatan residunya (DOBE) di pabrik kiln semen. Skenario tersebut terbukti layak secara ekonomi dan aman dari perubahan harga beli bahan baku dan penurunan harga jual produk sebesar 10%. Pemanfaatan HACPO dari SBE juga dapat menjadi peluang untuk menurunkan nilai gas rumah kaca (GRK) dalam produksi biodiesel. Pemanfaatan minyak nabati yang dilakukan dalam mengurangi kadar organik pada SBE, berdampak pada salah satu GRK yaitu metana (CH_4). Metana yang dihasilkan pada *landfill* lebih sedikit dibanding penimbunan secara langsung sehingga akan berdampak pada nilai GRK secara keseluruhan. Nilai GRK tersebut lebih rendah dari nilai GRK produksi biodiesel dari minyak sawit langsung. Skenario pemanfaatan residu padatnya (DOBE) oleh pihak ketiga yaitu pabrik kiln semen atau skenario Biodiesel-Kiln juga dapat dilakukan. Skenario Biodiesel-Kiln dapat mengurangi ekstraksi bentonit dari alam. Hasil penelitian dari Institut Teknologi Bandung (ITB) menunjukkan bahwa skenario Biodiesel-Kiln semen memiliki nilai *net present value* (NPV) yang positif, sehingga skenario tersebut layak secara ekonomi. Hal tersebut juga didukung oleh nilai *benefit cost ratio* (BCR) di atas angka 1. Nilai BCR di atas 1 menunjukkan bahwa benefit dari skenario lebih besar daripada pengeluaran yang telah dilakukan. Skenario Biodiesel-Kiln akan semakin efektif apabila memerhatikan kedekatan lokasi antara pengguna SBE dan penghasil SBE. Biaya yang ditanggung oleh pihak ke-3 juga akan lebih rendah jika dibandingkan dengan penimbunan, serta dekatnya jarak angkut yang lebih dekat menyebabkan skenario Biodiesel-Kiln semen lebih layak dibandingkan dengan skenario *Biodiesel-Landfilling*. Berdasarkan hal tersebut, perlu adanya pembangunan pusat pengelolaan sampah SBE yang dekat dengan lokasi ekonomi strategis, khususnya industri kelapa sawit.

Pemanfaatan limbah SBE sebagai bahan baku atau bahan pengganti tidak hanya mengurangi beban lingkungan yang ditimbulkannya, tetapi juga mengurangi beban lingkungan dari pengambilan sumber daya alam. Selain itu, melalui skenario pemanfaatan limbah SBE, beban lingkungan dapat dibagi melalui mekanisme ekonomi

VI.

PROSES RECOVERY SPENT BLEACHING EARTH DALAM Mendukung SYSTEM CIRCULAR ECONOMY

Limbah *Spent Bleaching Earth* (SBE) merupakan limbah yang dihasilkan dari proses pemurnian (*refining*) minyak sawit. Pengelolaan SBE yang paling umum dilakukan saat ini yaitu dibuang ke *landfills*, namun seperti yang dijelaskan di bab sebelumnya, hal tersebut dapat menimbulkan permasalahan baru apabila tidak dilakukan dengan benar, seperti dapat menyebabkan kebakaran dan polusi akibat dekomposisi sisa minyak, serta dapat menyebabkan emisi gas rumah kaca (GRK) yang disebabkan dekomposisi minyak di *landfills*. Pembuangan ke *landfills* juga akan lebih sulit dilakukan karena aturan pengelolaan lingkungan yang semakin ketat dan keterbatasan lokasi pembuangan. Mengingat potensi SBE yang begitu tinggi, perlu dilakukan karakterisasi dan kajian pengelolaan dan pemanfaatan SBE yang dapat mencegah pencemaran lingkungan sekaligus dapat memberikan manfaat sosial dan ekonomi serta tidak menghambat upaya pemerintah untuk meningkatkan hilirisasi industri kelapa sawit di dalam negeri.

Berdasarkan hal tersebut, tim peneliti dari Universitas Lampung dan Universitas Sahid melakukan penelitian berupa karakterisasi dan analisis pemanfaatan/proses *recovery* SBE serta

minyak yang terperangkap di dalam SBE sebagai hasil samping proses pemurnian minyak sawit menjadi biodiesel atau produk oleokimia lain, untuk mengurangi beban lingkungan dan meningkatkan citra unggul industri sawit. Beberapa tujuan dari penelitian yang telah dilakukan yakni a) melakukan karakterisasi SBE secara fisika dan kimia untuk menjadi pertimbangan bagi pelaku kebijakan tentang pengelolaan SBE dan sebagai dasar untuk pengembangan teknologi *recovery*, b) mengoptimalkan teknologi proses reaktivasi *De-oiled Bleaching Earth* (DBE) menjadi *Reactivated Bleaching Earth* (RBE) sebagai adsorben, 3) mengoptimalkan produksi katalis padat untuk pembuatan biodiesel yang lebih bernilai ekonomi tinggi dan ramah lingkungan, serta 4) memanfaatkan residu minyak dalam SBE sebagai bahan baku pembuatan biodiesel dan produk oleokimia yang lain.

Pengelolaan SBE secara *recovery* diharapkan akan dapat menciptakan sistem *Circular Economy* melalui penciptaan industri baru yang tidak hanya mampu menurunkan beban pencemaran lingkungan tetapi juga sekaligus menciptakan lapangan kerja baru dan meningkatkan nilai tambah SBE. Memberikan rekomendasi tentang kategori SBE sebagai limbah B3 agar dapat dikaji lebih dalam dari sisi regulasi pengelolaannya agar tercipta suatu kondisi yang menarik bagi upaya menciptakan *System Circular Economy* dalam pengelolaan SBE. Penelitian dimulai dengan pengujian analisis proksimat dari SBE yang diperoleh dari 2 industri refinery CPO, yakni PT Tunas Baru dan PT Wahana Citra Nabati. Hasil pengujian proksimat dari BE dan SBE dapat dilihat pada Tabel 14. Tabel 14 menunjukkan SBE dari kedua industri tersebut mengandung *volatile matter content* (VC) dan *kandungan fixed carbon* (FC). Nilai VC dan FC menunjukkan jumlah karbon total yang menguap dan tertinggal di dalam SBE. VC dan FC mewakili jumlah total kandungan minyak yang terdapat pada SBE. Kadar FC merupakan sejumlah karbon yang masih tersisa setelah semua kadar abu dan kadar volatil menguap saat dikeringkan pada temperature tinggi. Kadar VC menunjukkan

sifat kereaktifan suatu bahan, sehingga dari hasil penelitian diketahui bahwa SBE mempunyai sifat reaktif yang cukup tinggi. Tabel 15 juga menunjukkan bahwa SBE masih mengandung kadar abu yang lumayan tinggi (83.83-64.91% b/b). Tingginya kadar abu pada SBE menunjukkan banyaknya kandungan bahan anorganik yang berubah menjadi abu pada temperatur tinggi.

Selain melakukan pengujian berupa analisis proksimat, penelitian juga melakukan proses pengambilan minyak yang terperangkap di dalam SBE dengan menggunakan proses ekstraksi sokletasi dan metode maserasi ultrasonifikasi. Proses ekstraksi dilaksanakan dengan menggunakan pelarut hexane dan dichloromethane (DCM) dengan ratio SBE: pelarut sebesar 1: 5, selama 8 jam. Pelarut hexane dan DCM merupakan tipe pelarut tipe 2 yang bisa digunakan, namun harus dibatasi penggunaannya, dimana batas konsentrasi hexane sebesar 1000 ppm dan DCM sebesar 600 ppm. Penelitian tersebut berhasil memisahkan minyak yang tersisa di dalam SBE sebesar 90,63% dan jumlah minyak tersisa pada SBE sebesar 9-10% g/g. Perbandingan hasil ekstraksi dengan menggunakan pelarut hexane dan DCM terdapat pada Tabel 15. Data hasil ekstraksi dengan menggunakan hexane dengan metode sokletasi dan maserasi ultrasonik terdapat pada Tabel 16. Tabel 16 menunjukkan bahwa, baik dengan metode sokletasi maupun metode maserasi ultrasonik, menghasilkan karakteristik yang tidak terlalu berbeda dari setiap parameter yang diamati.

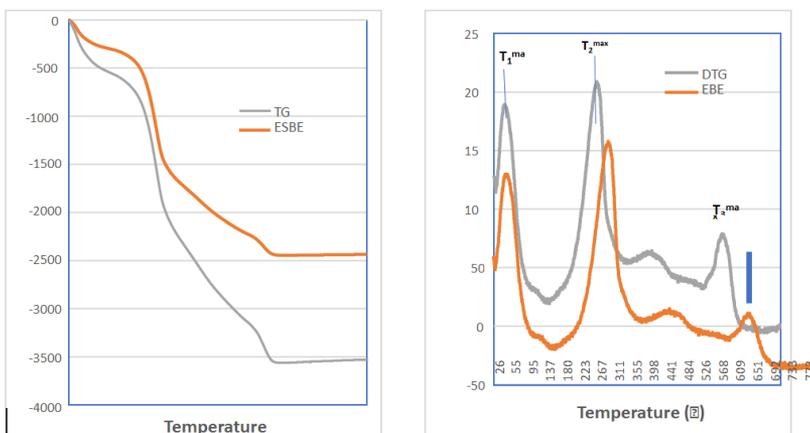
Tabel 15. Perbandingan hasil ekstraksi dengan hexane dan DCM

Parameter	ESBE (A) Heksana	ESBE (A) DCM	ESBE (B) Hexane	ESBE (B) DCM
Kadar air (MC), % (g/g)	1,30	2,37	3,47	2,88
Kadar zat terbang (VC), % (g/g)	18,41	23,05	17,63	22,00
Kadar abu (AC), % (g/g)	78,72	73,48	75,23	74,14
Fixed carbon (FC), % (g/g)	1,57	1,11	1,75	0,98
pH	6,05	5,93	5,5	5,44
Berat Jenis (g/ml)	2,01	2,28	2,02	1,67
Nilai Kalori (MJ/kg)	2,49	3,07	3,32	2,48

Tabel 16. Perbandingan hasil ekstraksi menggunakan hexane pada masing-masing metode

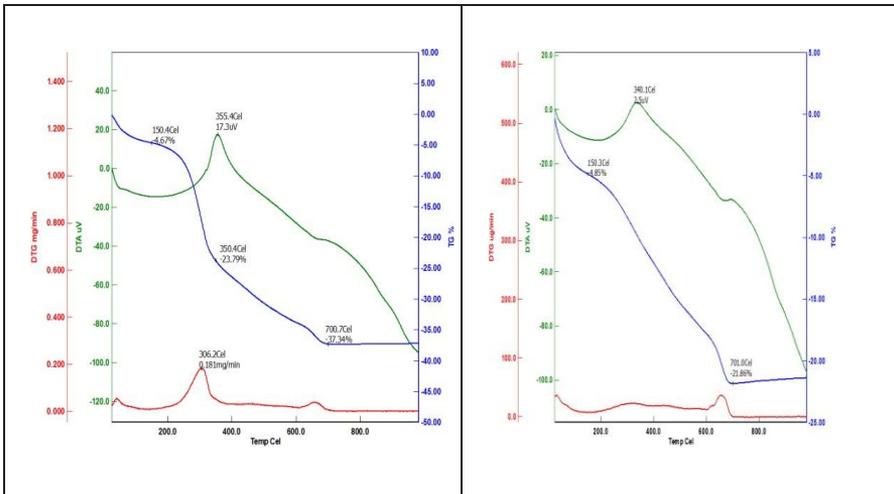
Parameter	BE	SBE	Sokletasi ESBE-Heksana	Ultrasonic ESBE-Heksana
Kadar Air (MC), % g/g	3,12	1,40	1,30	1,63
Kandungan zat terbang (VC)% (g/g)	5,17	33,12	18,41	19,35
Kadar Abu (AC) % (g/g)	91,44	64,91	78,72	77,46
Fixed carbon (FC) % (g/g)	0,27	0,58	1,57	1,56

Penelitian yang telah dilaksanakan juga menggunakan metode thermogravimetri untuk mengonfirmasi karakteristik dari SBE dan ESBE. Proses konfirmasi dilakukan untuk melihat persentase kandungan minyak yang masih terkandung baik di dalam SBE dan BE. Analisa dengan thermogravimetri dilaksanakan dengan metode pirolisis, dengan menggunakan gas niitrogen pada laju alir 10 °C/min (40 ml/min), dengan temperatur operasi berkisar antara 30 – 97 C dan sampel yang digunakan sebesar 6 (0,5) gram. Hasil analisis thermogravimetri terdapat pada gambar 10 dan 11.



Gambar 10. Kurva termogram (TG/DTG) untuk karakterisasi SBE dan ESBE

Gambar 11 menunjukkan adanya penurunan berat sampel yang terjadi selama proses pemanasan. Garis abu-abu pada gambar 11 menunjukkan bahwa masih terdapat kandungan karbon yang terdapat di dalam ESBE. Hal tersebut dapat ditandai pada kurva DTG bahwa terdapat 3 puncak yang menunjukkan adanya pelepasan massa carbon. T^{\max} termati pada kisaran temperatur 60-100 °C merupakan kondisi pelepasan uap air. T_2^{\max} selanjutnya teramati pada kisaran temperatur 300-400 C menunjukkan pelepasan kandungan zat volatil. T^{\max} teramati pada kisaran temperatur 600- 690 C menunjukkan adanya kandungan karbon tetap sisa hasil pemanasan. Hasil penelitian tersebut sejalan dengan hasil pengukuran dengan hexane dan DCM pada metode sokletasi dan maserasi, apabila diamati berdasarkan persentase massa sampel seperti yang ditampilkan pada gambar 12.



Gambar 11. Kurva thermogram (TG/DTG/DTA)

Gambar 11 menunjukkan adanya peristiwa dehidrasi dan dehidrogenasi selama proses pemanasan, sehingga menyebabkan terjadinya pelepasan uap air dan penguapan minyak atau kandungan bahan organik yang terdapat di dalam SBE dan ESBE yang terdekomposisi secara endotermik. Tahap ke tiga menjelaskan

tentang adanya kehilangan massa *hydroxyl* yang terdapat di dalam SBE. Hasil Analisa TG/DTG yang didapatkan pada penelitian ini sesuai dengan yang dijelaskan oleh Saputro *et al.*, 2020 yang menyatakan bahwa pada tahap ketiga proses pemanasan ada terjadinya sedikit dekomposisi atau kehilangan massa gugus *hydroxyl* yang berikatan dengan silika gugus (Si-OH).

Selain itu, data analisis TG/DTG juga mengkonfirmasi bahwa persentase minyak yang ada di dalam SBE adalah sekitar 28-30%, sedangkan di dalam ESBE kandungan minyak masih ada sekitar 10-12%. Hal tersebut menunjukkan bahwa data perhitungan kandungan minyak sisa di dalam SBE dan ESBE sudah tepat, dan membuktikan bahwa proses ekstraksi secara sokletasi dengan dua jenis pelarut hanya mampu memberikan persen *recovery* sebesar 90% saja. Hasil penelitian tersebut membuktikan bahwa proses ekstraksi yang telah dilakukan tidak dapat menurunkan kadar minyak di dalam SBE menjadi 3% (sesuai dengan arahan pemerintah), namun apabila kadar minyak ingin diturunkan sampai dengan 3%, maka diperlukan proses lebih lanjut berupa pemanasan dengan temperature berkisar antara 600-690 C.

Setelah proses ekstraksi dilaksanakan, tahap selanjutnya adalah tahap pengumpulan minyak residu. Minyak residu hasil ekstraksi selanjutnya dianalisa kadar asam lemak bebas (FFA) dan bilangan peroksida mengikuti SNI 7431:2015. Data hasil analisa karakteristik minyak residu ditampilkan pada Tabel 17. Tabel 17 menunjukkan bahwa minyak residu mempunyai nilai asam lemak bebas (*free fatty acid*/FFA) sebesar 8,25 %. Data tersebut dibutuhkan untuk memutuskan perlakuan yang tepat pada proses pembuatan biodiesel yang harus melewati tahap esterifikasi dan transesterifikasi.

Tabel 17. Data karakteristik minyak residu

Sampel	FFA (%)	Uji Penyabunan (mg KOH/g)	Uji Peroksida (meq O ₂ /kg)
RO	8,25	105,47	13,22
CPO	4,67	149,08	2,88
CPO Adsorp RBE _{H₂SO₄}	2,57	-	34,71
CPO Adsorp RBE _{HCl}	2,90	99,02	-

Minyak residu hasil ekstraksi dengan menggunakan dua pelarut memberikan tampilan fisik yang sangat berbeda jika diamati dari warna yang dihasilkan. Seperti yang diperlihatkan pada gambar 13, minyak residu hasil ekstraksi dengan menggunakan pelarut heksana memberikan warna kuning jernih, sedangkan hasil ekstraksi dengan menggunakan pelarut diklorometan memberikan warna kuning gelap kecoklatan. Analisis kadar betacarotene (Spectrofotometer UV-VIS) menunjukkan hasil yang sangat berbeda. Minyak residu hasil ekstraksi dengan menggunakan heksana memberikan kadar karoten (DOBI) = 6,4 ppm. Minyak residu hasil ekstraksi dengan menggunakan diklorometana memberikan kadar karoten (DOBI) sebesar 302,3 ppm. Data tersebut menunjukkan bahwa pemilihan pelarut diklorometan sangat direkomendasikan untuk mengisolasi betacarotene yang terdapat di dalam SBE, karena dikloromethane mempunyai titik didih yang rendah (39,8 C) sehingga tidak membuat betacarotene terurai. Betacarotene merupakan senyawa non polar yang sangat tidak stabil dan mudah terdegradasi pada suhu sekitar 50-60 C. Penggunaan pelarut hexane yang memiliki temperatur didih sekitar 69 C mampu mendekomposisikan betacarotene yang terdapat di dalam SBE.

Food and Drug Administration (FDA) dan Badan Pengawas Obat dan Makanan (2023) menyatakan bahwa pelarut hexane dan dikloromethane merupakan pelarut golongan II, yang harus dibatasi penggunaannya karena bersifat karsinogenik. Namun, kedua pelarut tersebut tidak bersifat genotoksik (pelarut yang dicurigai menyebabkan toksisitas yang dapat diubah). Batas konsentrasi hexane di dalam sampel bahan makanan/farmasi sebesar 100 ppm, sedangkan dikloromethane sebesar 600 ppm. Berdasarkan hal tersebut, pelarut hexane dan dikloromethane tidak terlalu beresiko ketika digunakan sebagai pelarut dalam proses ekstraksi residu oil pada industri pemurnian sawit, asalkan masih dalam batas konsentrasi yang dianjurkan.



Gambar 12. Minyak residu hasil ekstraksi dengan metode sokletasi
(a) Pelarut Heksana ; (b)Pelarut Diklorometana.

Hasil dari proses ekstraksi minyak residu dengan metode kimia dan *thermal* selanjutnya direaktivasi dengan menggunakan dua jenis asam mineral yaitu H_2SO_4 dan HCl pada berbagai konsentrasi, waktu aktivasi dan temperatur pemanasan, Karakterisasi *bleaching earth* setelah sebelum dan setelah aktivasi dapat dijelaskan pada gambar 13.



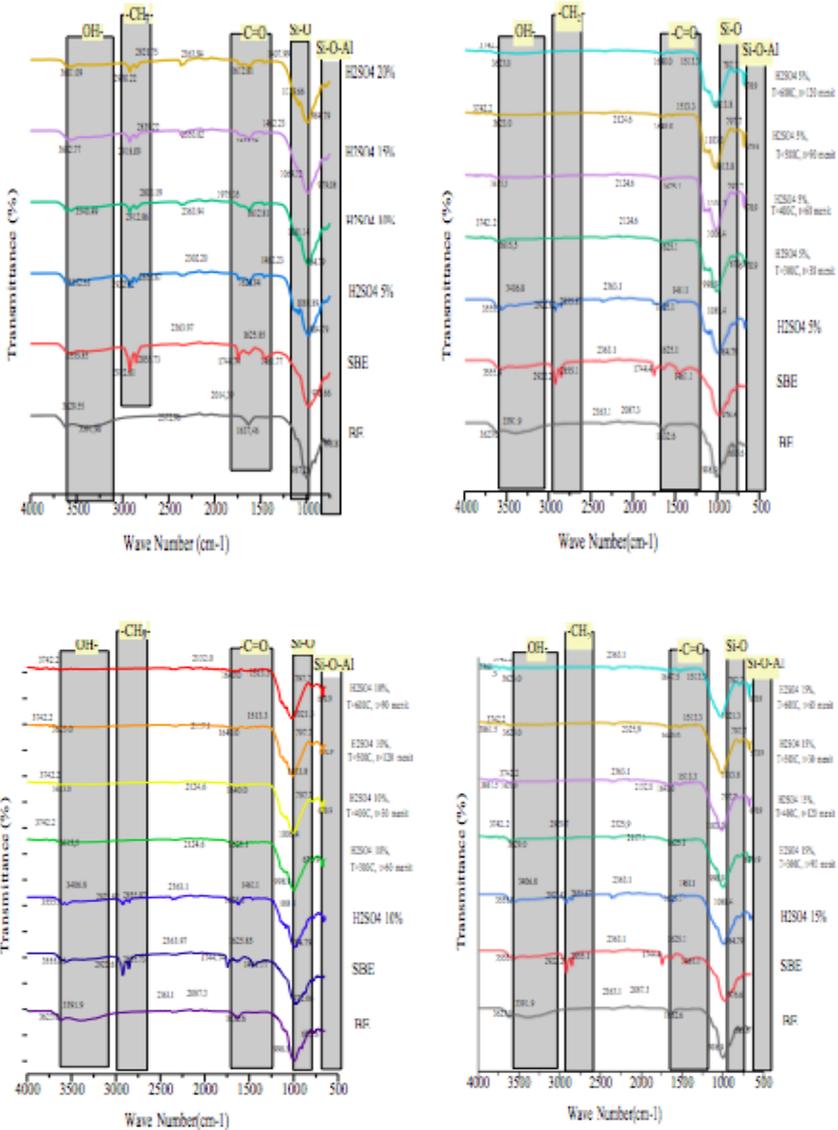
Gambar 13. Perubahan warna SBE sebelum dan sesudah diaktivasi secara kimia dan termokimia

Gambar 13 menunjukkan perubahan warna pada SBE akibat proses aktivasi secara kimia dan termokimia. Perubahan terhadap warna setiap perlakuan *bleaching earth* (BE) selanjutnya dibandingkan dengan BE komersial. BE komersial pada awalnya berwarna putih kekuning-kuningan. Sedangkan, SBE hasil proses adsorpsi minyak berwarna coklat gelap dan berminyak. Warna hitam pada SBE disebabkan senyawa organik yang terjerap di dalam struktur SBE. Proses aktivasi secara kimia dapat mengubah warna tersebut menjadi lebih terang dan berwarna keabu-abuan. Hal tersebut mengindikasikan bahwa senyawa organik yang terdapat pada struktur SBE terlepas. Hal tersebut juga menunjukkan bahwa minyak yang terperangkap di dalam SBE sebagian dapat direcovery.

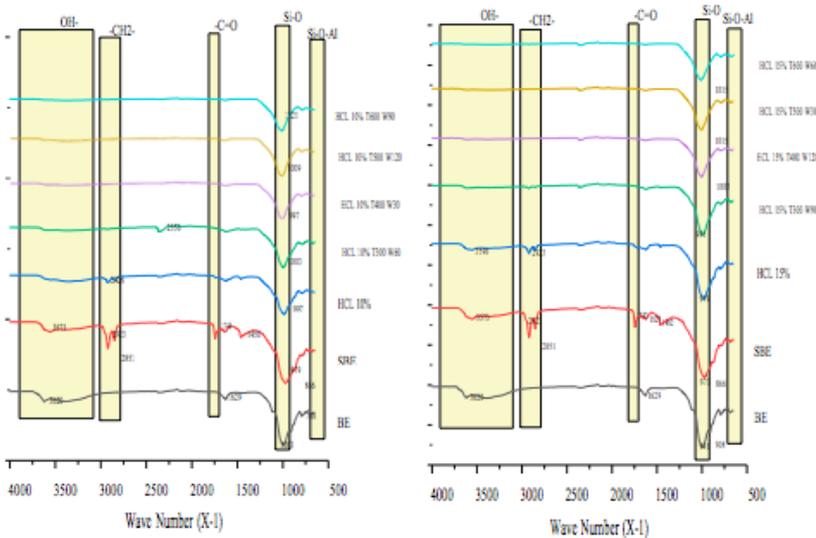
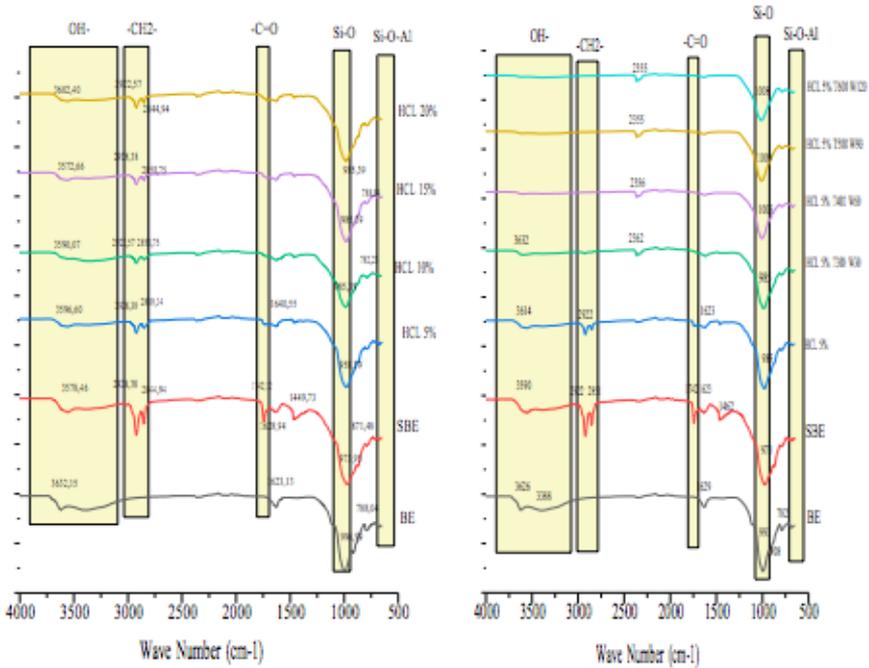
Gambar 13 juga menunjukkan bahwa HCl dan H₂SO₄ mampu memutihkan warna BE walaupun dari segi kualitas tidak terlalu mendekati BE komersial. HCl atau H₂SO₄ dapat meningkatkan daya pemucat karena asam mineral tersebut dapat melarutkan atau bereaksi dengan komponen berupa tar, garam Ca dan Mg yang menutupi pori-pori adsorben., sehingga membuat warna BE menjadi putih. Hasil yang berbeda ditunjukkan dari proses aktivasi yang melibatkan proses termokimia, yang menyebabkan warna RBE menjadi lebih gelap. Hal tersebut diduga karena minyak terdegradasi selama proses pemanasan dan meninggalkan karbon di atas permukaan RBE, sehingga berwarna lebih gelap. Untuk melihat efek perlakuan termokimia terhadap ukuran pori, maka dibutuhkan analisa luas permukaan pori dengan menggunakan BET. Selain warna, perubahan gugus fungsi sebelum dan sesudah aktivasi juga dilakukan.

Hasil analisis menggunakan FTIR menunjukkan adanya perubahan gugus kimia dari setiap sampel yang dianalisa. Data spectrogram memperlihatkan adanya perubahan gugus C-H alkana, C=C dan C=O pada SBE yang terbaca pada bilangan gelombang 2923 cm⁻¹, 1748 cm⁻¹ dan 1629 cm⁻¹ yang sebagian besar tidak ada pada BE. Peak tersebut dimungkinkan dari struktur beta-karoten dan senyawa organik berupa minyak yang terjerap pada pori-pori SBE. Pita serapan gugus kimia organik tersebut selanjutnya mulai bergeser dan tidak teramati setelah dilakukan proses aktivasi dengan asam dan panas. Pita serapan RBE tersebut menghilang disebabkan adanya proses kalsinasi dan aktivasi asam, yang dapat menghilangkan senyawa *volatile* yang terkandung di dalam SBE. RBE yang diperoleh dalam penelitian yang telah dilakukan sebanding dengan BE komersial. Hal tersebut menunjukkan bahwa proses aktivasi dapat menyingkirkan kandungan minyak yang terdapat pada SBE dan memulihkan konsisi adsorben menjadi seperti sifat adsorben awal (BE).

Pengamatan hasil spectrogram gugus anorganik seperti Si-O, Si-O-Al juga teramati pada bilangan gelombang 1021 cm^{-1} dan 800 cm^{-1} , dengan menunjukkan adanya struktur montmorillonite. Hasil tersebut juga menunjukkan bahwa perlakuan aktivasi pada berbagai konsentrasi asam HCl dan H₂SO₄ konsentrasi 5-15% dan temperatur rendah tidak menunjukkan perubahan sifat matrik silika dan alumina. Data yang teramati setelah aktivasi memperlihatkan kedua gugus -Si-O dan Si-O-Al cenderung stabil menyerupai sifat gugus yang teramati pada BE pada kondisi tersebut. Namun, perlakuan aktivasi pada konsentrasi tinggi terutama jika menggunakan HCl menunjuk adanya sedikit perubahan pada matrik silika tersebut. Berbeda dengan gugus -OH, perubahan yang sangat signifikan terjadi pada setiap sampel yang dianalisa. Gugus -OH yang dapat terlihat pada panjang gelombang 3629 cm^{-1} menunjukkan adanya perubahan yang signifikan, sehingga mengindikasikan bahwa proses aktivasi dapat membantu terjadi reaksi dehidrasi gugus -OH yang terkandung di dalam BE. Hasil FTIR Spectogram pada SBE dan RBE dengan perlakuan H₂SO₄ pada berbagai konsentrasi dan hasil FTIR Spectogram SBE dan RBE yang diaktivasi dengan 5%, 10%, 15% H₂SO₄ pada berbagai temperatur dan waktu aktivasi dapat dilihat pada gambar 15. Hasil FTIR Spectogram SBE dan RBE yang diaktivasi dengan 5%, 10%, 15% HCl pada berbagai temperatur dan waktu aktivasi dapat dilihat pada gambar 14.

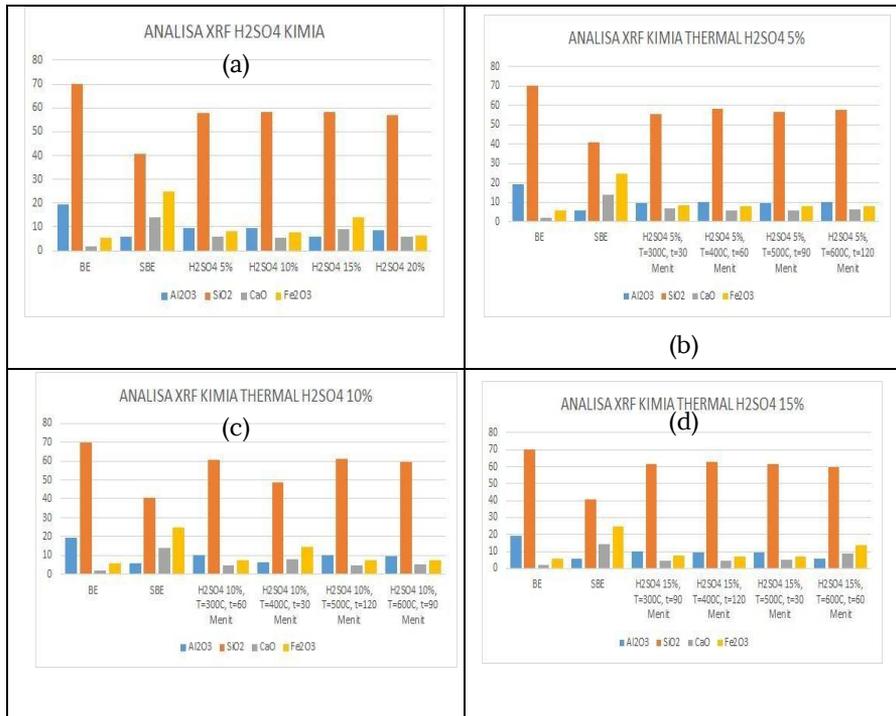


Gambar 14. Hasil FTIR Spectrogram pada SBE dan RBE dengan perlakuan H2SO4 pada berbagai konsentrasi dan hasil FTIR Spectrogram SBE dan RBE yang diaktivasi dengan H2SO4 pada berbagai temperatur dan waktu aktivasi



Gambar 15. Hasil FTIR Spectrogram SBE dan RBE yang diaktivasi dengan 5%, 10%, 15% HCl pada berbagai temperatur dan waktu aktivasi

Penelitian yang dilakukan juga mengamati komposisi kimia BE dan SBE sebelum dan sesudah aktivasi dengan menggunakan berbagai variasi konsentrasi H₂SO₄ dan HCl pada berbagai temperature dan waktu aktivasi, yang dilakukan dengan XRF. Hasil analisa XRF dengan H₂SO₄ dapat dilihat pada gambar 16 sedangkan dengan menggunakan HCl dapat dilihat pada gambar 17



Gambar 16. Perbandingan komposisi kimia BE dan SBE sebelum dan sesudah Aktivasi dengan menggunakan berbagai variasi konsentrasi H₂SO₄ pada berbagai temperature dan waktu aktivasi

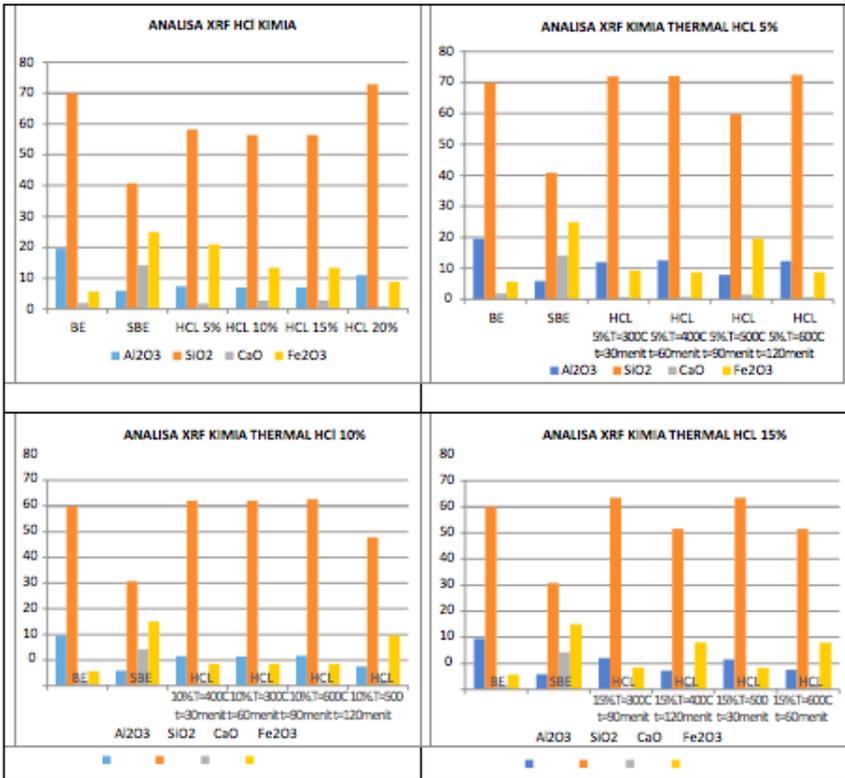
Gambar 16 menunjukkan komposisi unsur BE, SBE, dan RSBE. Sampel yang dianalisa semua menunjukkan adanya komposisi elemen khas yang terdapat di dalam sampel BE komersial, SBE dan RBE. Komposisi seperti silikon, alumina, kalsium, dan besi cenderung stabil selama terjadinya perlakuan aktivasi. Komposisi Si pada BE

komersial pada awalnya adalah sebesar 70%, sedangkan pada RSBE pada setiap perlakuan sekitar 59–62%. Hal tersebut terjadi diduga karena adanya kandungan minyak di dalam SBE dan RBE, sehingga adanya jumlah karbon menyebabkan persentasi silika tidak sebanding dengan BE.

Gambar 16 juga memperlihatkan, kandungan Si_2O_3 dan Fe_2O_3 di dalam sampel cenderung stabil pada perlakuan aktivasi dengan menggunakan berbagai variasi konsentrasi H_2SO_4 . Hasil yang sama juga diperlihatkan pada perlakuan aktivasi secara termokimia. Peningkatan waktu dan temperatur aktivasi tidak merubah struktur silika dan besi di dalam RBE. Namun, hal tersebut tidak berlaku pada Al_2O_3 . Senyawa Al_2O_3 pada konsentrasi H_2SO_4 5-10% belum mengalami proses degradasi. Namun, pada peningkatan konsentrasi H_2SO_4 di atas 10% terjadi penurunan kandungan Al_2O_3 secara signifikan. Hasil yang berkebalikan dengan senyawa Al_2O_3 , kondisi RBE bila dibandingkan dengan BE komersial setelah proses aktivasi, dapat meningkatkan kandungan CaO pada sampel. Hal tersebut memperkuat dugaan yang reaksi kalsinasi selama terjadinya proses aktivasi pada konsentrasi asam, waktu dan temperatur yang tinggi.

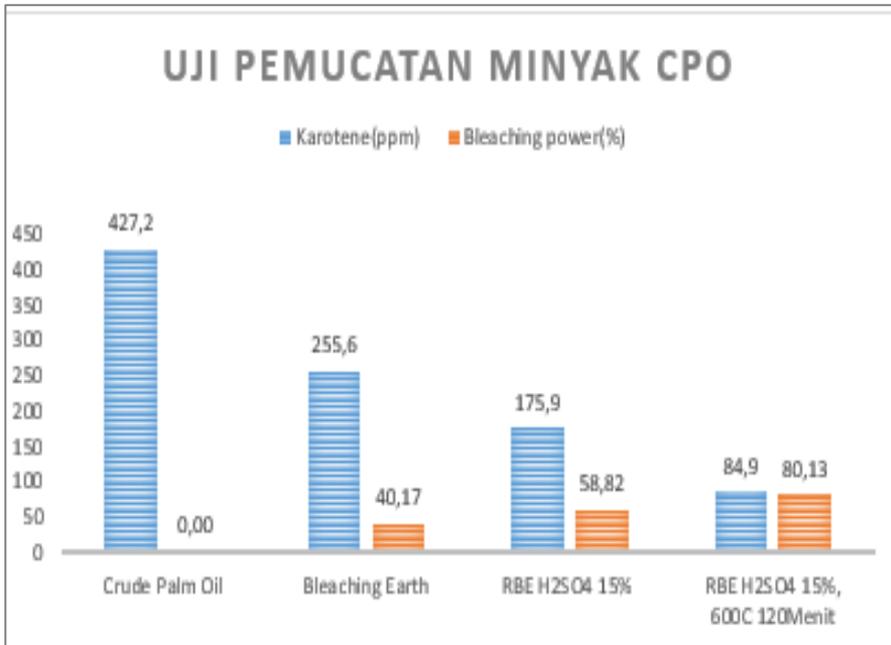
Fenomena yang sama ditunjukkan pada data analisa XRF yang mengamati perubahan komposisi mineral di dalam BE, SBE, dan RSBE, yang diberi perlakuan HCl (Gambar 17). Sampel BE komersial, SBE dan RBE yang dianalisa menunjukkan adanya komposisi elemen khas. Komposisi seperti silika, alumina, kalsium, dan besi cenderung stabil selama terjadinya perlakuan aktivasi dengan HCl pada temperatur rendah. Namun, RSEB yang diaktivasi pada konsentrasi dan temperatur tinggi, menurunkan kandungan silika di dalam RSBE. Hal tersebut menunjukkan bahwa struktur matrik silika mengalami disrupsi pada perlakuan dengan asam dan temperatur pada kondisi ekstrim. Gambar 17 juga memperlihatkan, Fe_2O_3 , CaO dan Al_2O_3 di dalam sampel cenderung stabil pada perlakuan aktivasi dengan menggunakan berbagai variasi konsentrasi HCl , demikian pula ketika

perlakuan aktivasi secara termokimia. Peningkatan waktu dan temperatur aktivasi juga tidak mengubah struktur di dalam RBE.

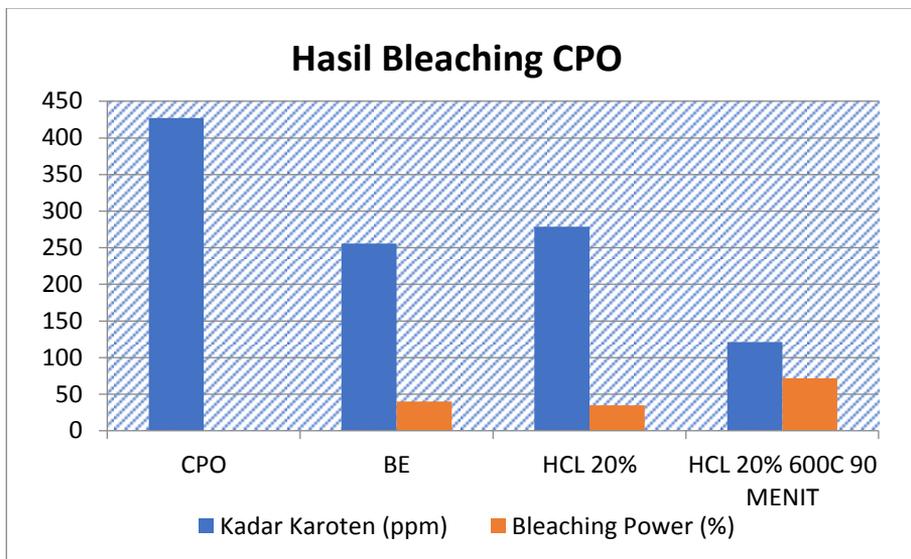


Gambar 17. Perbandingan komposisi kimia BE dan SBE sebelum dan sesudah Aktivasi dengan menggunakan berbagai variasi konsentrasi HCl pada berbagai temperatur dan waktu aktivasi.

Penelitian yang telah dilaksanakan juga melakukan uji daya pemucatan (*power of bleaching*) RBE terhadap CPO. Persentase *power of bleaching* pada reaktivasi kimia dan kimia fisika terbaik dengan menggunakan H₂SO₄ dapat dilihat pada gambar 18, sedangkan Persentase *power of bleaching* dengan menggunakan HCl dapat dilihat pada gambar 19.

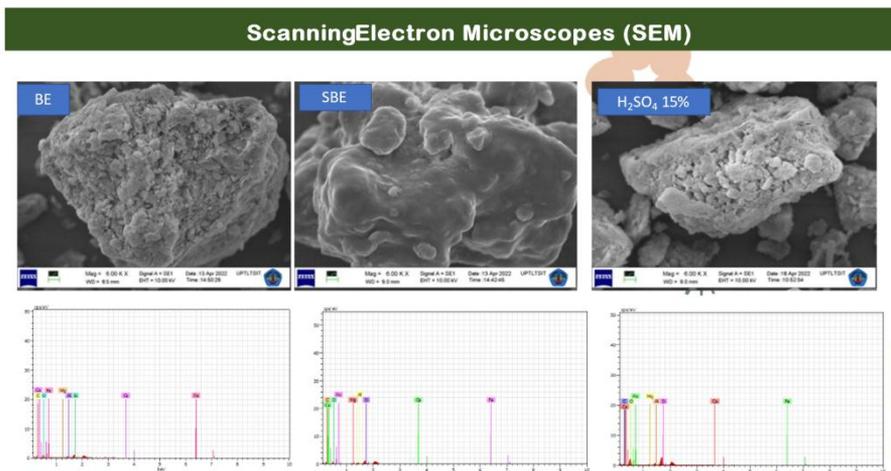


Gambar 18. Persentase *Bleaching Power* H₂SO₄ Pada Reaktivasi Kimia dan Kimia Fisika Terbaik



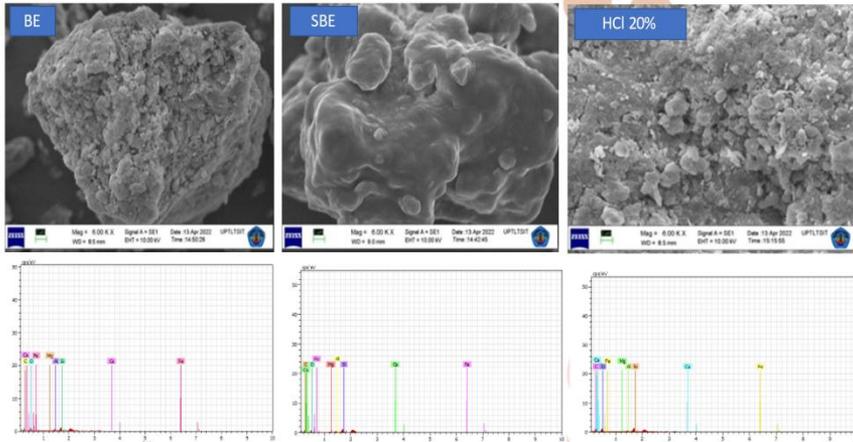
Gambar 19. Persentase *Bleaching Power* HCl Pada Reaktivasi Kimia dan Kimia Fisika Terbaik

Hasil penelitian menunjukkan bahwa RBE dari semua perlakuan menghasilkan persen daya pemucat lebih tinggi jika dibandingkan dengan BE komersial. Daya pemucat yang telah diaktivasi secara kimia oleh H₂SO₄ dan HCl mempunyai persentase daya pemucat yang lebih baik bila dibandingkan dengan perlakuan secara kimia fisika. Reaktivasi dengan HCl menghasilkan persentase daya pemucat yang lebih baik dari H₂SO₄. HCl lebih reaktif bila dibandingkan dengan H₂SO₄. Pada kondisi perlakuan reaktivasi dengan kimia fisika, didapatkan hasil *power of bleaching* yang lebih rendah karena kemungkinan struktur permukaan RBE mengalami perubahan, sehingga mengurangi kemampuan pemutihan dari adsorben hasil reaktivasi (RBE). Penelitian yang telah dilakukan juga mengamati struktur permukaan dan ukuran pori dari BE, SBE, dan RBE menggunakan *scanning electron microscope* (SEM). Hasil analisa SEM baik dengan menggunakan H₂SO₄ dan HCl terdapat pada gambar 20 dan gambar 21



Gambar 20. Data hasil analisis SEM BE, SBE dan RBE (H₂SO₄ 15%)

ScanningElectronMicroscope



Gambar 21. Data hasil analisis SEM BE, SBE dan RBE (HCl 15%)

Selain melakukan karakterisasi pada BE, SBE, dan RBE juga dilakukan analisa ukuran pori RBE dengan *Brunauer-Emmet-Teller* (BET). Karakterisasi dengan analisis BET dilaksanakan untuk dapat mengetahui luas permukaan adsorben, volume pori dan diameter pori sampel dapat digunakan metode dengan adsorpsi-desorpsi gas nitrogen. Proses analisa material pori meso dapat diketahui melalui grafik *isotherm* Langmuir berdasarkan nilai perbandingan P/P_0 (mmHg) terhadap volume N_2 per gram sampel (cc/g). Isoterm adsorpsi-desorpsi nitrogen untuk dua sampel yang didapatkan dari proses reaktivasi dengan menggunakan dua jenis activator yaitu H_2SO_4 dan HCl selanjutnya dibandingkan dengan BE awal.

Data hasil analisis dengan BET menunjukkan bahwa terdapat perbedaan yang signifikan dari luas permukaan BE dan RBE. ESBE yang teraktivasi memiliki luas permukaan yang jauh lebih besar dari sebelum diaktivasi. Proses aktivasi asam dan kalsinasi mengakibatkan perubahan luas permukaan dan volume pori. Proses aktivasi asam menyebabkan terjadinya perubahan kerangka dari BE akibat adanya reaksi hidrolisis. Perubahan kerangka BE akan

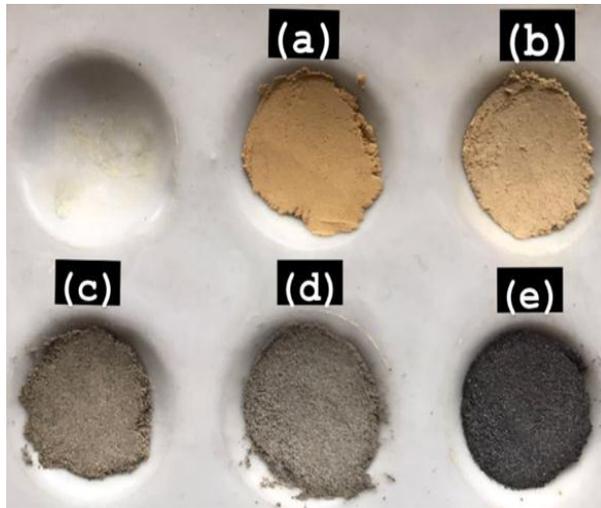
menyebabkan perubahan pori-pori sehingga menyebabkan perubahan juga pada luas permukaan dan volume pori. Material mikropori adalah material dengan diameter pori kurang dari 2 nm, dan material mesopori adalah material dengan diameter pori 2 – 50 nm dan pada material makropori yaitu memiliki diameter pori > 50 nm.

Selain melakukan karakteristik BE, SBE, dan RBE, juga dilakukan sintesis dan karakterisasi katalis padat untuk proses produksi biodiesel. Proses sintesis katalis padat yang dilakukan menggunakan proses impregnasi KOH dengan beberapa modifikasi. Proses dimulai dengan pencucian RBE dengan menggunakan larutan hydrogen peroksida (H_2O_2). Proses produksi katalis menggunakan lima variabel konsentrasi KOH yaitu 5%, 10%, 15%, 20%, dan 25% dari muatan KOH dan rasio antara larutan KOH terhadap RBE adalah 250mL KOH:100gr RBE. Proses impregnasi dilakukan dengan memasukkan sampel RBE ke dalam labu alas bulat leher tiga (250 mL) yang dilengkapi dengan *magnetic stirrer*, *reflux condenser*, *thermometer*, dan *hotplate*. Peresapan RBE dengan KOH dilakukan pada suhu 60 C selama 24 jam dengan pengadukan kontinyu 400 rpm. Setelah proses impregnasi selesai, *slurry* dikeringkan dalam oven selama 24 jam pada suhu 110 C, dan dikalsinasi dalam tungku pada suhu 500 C selama 5 jam. Produk yang dikalsinasi disebut dengan katalis padat. Katalis padat diayak menggunakan saringan dengan ukuran 100 mesh untuk mendapatkan ukuran partikel yang seragam.

Katalis padat yang telah diperoleh selanjutnya dianalisis dengan pola *Powder X-Ray Diffraction (XRD)* yang direkam pada MPD PANalytical pada 40 kV dan 30 mA menggunakan radiasi Cu K α dengan ukuran langkah 0,001°. X-Ray Fluorescence (XRF) direkam pada PANalytical Epsilon 3 untuk menentukan komposisi unsur katalis. Dan analisis kualitatif untuk katalis dilakukan dengan metode Fourier Transform InfraRed menggunakan *Agilent Technologies Cary 630* dengan fungsi Happ Genzel. Analisis FTIR dilakukan pada

rentang gelombang 4000–650 cm^{-1} . Katalis padat selanjutnya diaplikasikan dalam biodiesel. Langkah pertama dalam proses pembuatan biodiesel adalah menentukan kandungan FFA dalam minyak dengan menggunakan analisis titrimetri. Standar kadar FFA yang diizinkan adalah $< 2,5\%$. Apabila minyak mengandung FFA lebih dari $2,5\%$, maka diperlukan perlakuan lebih lanjut untuk menurunkan kandungan FFA tersebut dengan melakukan proses esterifikasi dengan penambahan katalis H_2SO_4 1% dari volume minyak yang digunakan. Proses esterifikasi dilakukan selama 1 jam pada suhu 60 C . Selanjutnya sampel dipindahkan ke dalam corong pisah untuk memisahkan minyak dan metanol. Minyak hasil esterifikasi kemudian dibilas menggunakan akuades hingga pH air pencuci netral. Langkah terakhir, sampel minyak hasil esterifikasi dimasukkan ke dalam oven hingga berat minyak konstan dan akan digunakan untuk proses transesterifikasi.

Transesterifikasi minyak sawit hasil esterifikasi dilakukan menggunakan labu alas bulat leher tiga yang dilengkapi dengan refluks kondensor, indikator suhu, dan pengaduk magnet dan reaktor ditempatkan dalam hotplate. Sejumlah katalis heterogen (padat) yang diketahui (3% , 5% , 7% dan 9%) ditambahkan ke dalam campuran minyak dan metanol pada (minyak:metanol) $1:4$, $1:6$, $1:8$, dan rasio $1:10$. Campuran tersebut kemudian dipanaskan pada suhu yang diinginkan (45 C , 50 C , 55 C , dan 60 C dengan variabel waktu (60 menit, 90 menit, 120 menit, dan 150 menit). Selanjutnya, campuran tersebut dipindahkan ke corong pisah untuk memisahkan produk biodiesel dan gliserol yang dihasilkan. Sampel selanjutnya dicuci menggunakan akuades dengan menambahkan 100 ml akuades dan didiamkan semalaman agar terdapat lapisan antara biodiesel dengan air pencuci. Biodiesel dicuci $3-4$ kali sampai pH air pencuci netral. Selanjutnya, sampel biodiesel dimasukkan ke dalam oven pada suhu 110 C selama $7-8$ jam sampai berat biodiesel konstan. Hasil katalis padat dari RBE menggunakan HCl dan H_2SO_4 dapat dilihat pada gambar 22 dan gambar 23.



Gambar 22. Katalis Padat dari RBE HCl 20% dengan Perbedaan Konsentrasi KOH (a) Katalis Konsentrasi KOH 5%, (b) Katalis Konsentrasi KOH 10%, (c) Katalis Konsentrasi KOH 15%, (d) Katalis Konsentrasi KOH 20%, (e) Katalis Konsentrasi KOH 25%



Gambar 23. Katalis Padat dari RBE H₂SO₄ 15% dengan Perbedaan Konsentrasi KOH: (a) Sampel Dicuci Menggunakan H₂O₂ 30%, (b) Katalis Konsentrasi KOH 5%, (c) Katalis Konsentrasi KOH 10%, (d) Katalis Konsentrasi KOH 15%, (e) Katalis Konsentrasi KOH 20%, (f) Katalis Konsentrasi KOH 25%

Hasil pola XRD untuk katalis padat (beban KOH 5%, 10%, 15%, 20%, dan 25%) dan bentonit mentah. Seperti yang dapat dilihat, apabila muatan KOH ditingkatkan, maka kristalinitas katalis berkurang. Hal tersebut dapat disebabkan oleh pori-pori luas permukaan partikel yang masih terisi silika dari *bleaching earth*. Sehingga, banyaknya kation K^+ atau berkurangnya luas permukaan kekosongan bebas pada sampel dapat menyebabkan munculnya senyawa lain. Refleksi yang diamati dari pengukuran XRD sekitar 2θ adalah = 81,13%, 78,44%, 57,27%, 11,96%, dan 11,59 % kristalinitas.

Semakin banyak senyawa kalium yang dimuat pada sampel, semakin banyak ruang kosong pada sampel yang akan terisi, sehingga akan mempengaruhi secara langsung hasil dari nilai kristalinitas pada setiap sampel. Kekosongan akan terisi oleh K^+ dan tersebar secara merata ketika jumlah kation K^+ berada di bawah serapan jenuh. Namun, jika sampel diisi dengan kation K^+ yang terlalu banyak, kation tidak akan terdispersi dengan baik, dan hanya sebagian dari K^+ yang dimuat dapat terdekomposisi. Kelebihan ion K^+ akan menutupi luas permukaan katalis dan akan menyebabkan penurunan aktivitas katalitik. Pembentukan komponen $K_2Mg(SiO_4)$ berasal dari senyawa $K_2O-MgO-SiO_2$ yang terbentuk dari proses reaksi pada kondisi temperatur tinggi. Penelitian yang telah dilakukan juga teridentifikasi bahwa SiO_4 dengan kerangka tetrahedral terhubung dengan Mg_2O_4 tetrahedral, sedangkan ketika ditambahkan dengan KOH (adanya ion K^+), ion K^+ akan terperangkap diantara cabang tetrahedral pada kedua komponen tersebut. Ion K^+ kemungkinan dapat terperangkap ketika suhu proses reaksi naik hingga mencapai $500^\circ C$, sehingga pada suhu yang tinggi banyak ion K^+ yang menempel pada rongga-rongga ikatan tetrahedral dan hal tersebut berpengaruh pada hilangnya fasa $KAlSiO_4$.

Investigasi berkelanjutan tentang sampel *K-Impregnated Bleaching Earth Catalyst Performance* juga dilakukan dengan spektroskopi IR. Penambahan KOH jelas mempengaruhi struktur bentonit (dengan perubahan nyata dari penambahan KOH 15%.

Spektrum menunjukkan adanya gugus fungsi seperti Al-O-K (3429.2 cm^{-1}), tekukan H-O-H ($16549.9 - 1640\text{ cm}^{-1}$), ikatan C=C dan O-H (1446.2 cm^{-1}) Peregangan Si-O-Si ($976,6 - 961,7\text{ cm}^{-1}$), tekuk OH yang dibatasi Al^{3+} dan Fe^{3+} ($954,2 - 939,3\text{ cm}^{-1}$), ulur Si-O ($775,3\text{ cm}^{-1}$), dan Si-O-Al ($685,8 - 693,3\text{ cm}^{-1}$). Analisis BET juga dilakukan pada katalis padat yang disntesis. Analisis BET merupakan analisis yang berfungsi untuk mengetahui besaran luas pendistribusian permukaan pori dari suatu sampel dan juga bentuk dari struktur pori tersebut. Hasil penelitian menunjukkan adanya perbandingan besar luas permukaan pori dari kedua sampel bahan baku didapati bahan baku yang telah diaktivasi oleh asam HCl 20% memiliki luas permukaan yang lebih rendah dibandingkan dengan yang teraktivasi oleh larutan H_2SO_4 15%. Luas permukaan pori sampel yang semakin besar akan mempengaruhi banyaknya molekul lain untuk menempel pada permukaan pori. Semakin besar permukaan pori bahan baku akan mempengaruhi jumlah molekul yang akan diisi atau memenuhi permukaan pori. Dengan jumlah molekul senyawa yang diharapkan (yaitu KOH) semakin banyak pada permukaan pori, maka akan meningkatkan kualitas pada proses katalitik dari produk katalis. Proses yang telah dilakukan dalam mengolah limbah SBE menjadi produk bahan baku katalis tentunya akan mempengaruhi besaran luas permukaan pori sampel. Pembuatan katalis dengan bahan baku adalah *fresh bleaching earth*, didapati hasil bahwa luas permukaan pori sampel yang telah teraktivasi dan dicuci dengan larutan H_2O_2 lebih kecil dibandingkan dengan bahan baku yang baru. Perbandingan hasil analisa BET bahan baku terdapat pada Tabel 18, sedangkan perbandingan ukuran pori bahan baku dan produk katalis terdapat pada Tabel 19.

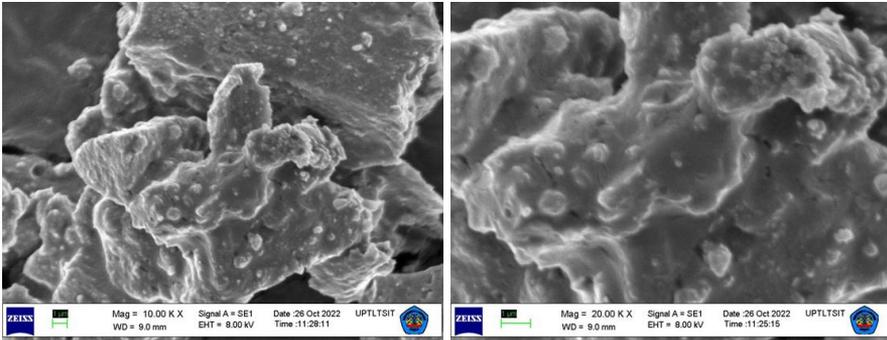
Tabel 18. Perbandingan Hasil Analisa BET Bahan Baku

Parameter	Produk		
	Raw bentonite (Soetaredjo et al., (2011))	RBE HCl 20%	RBE H ₂ SO ₄ 15%
Luas Permukaan Pori (m ² /g)	197	74,3468	44,4277
Volume Pori (cc/g)	0,31	0,157078	0,121634
Radius Pori (Å)	-	16,2	16,2

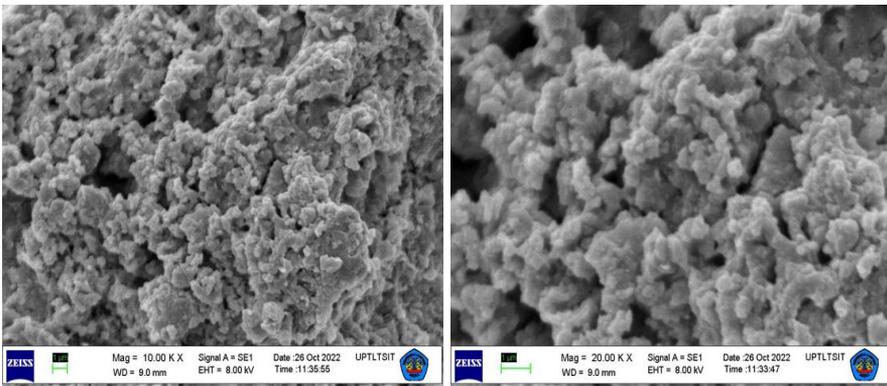
Tabel 19 Perbandingan Ukuran Pori Bahan Baku dan Produk Katalis

No.	Produk	Ukuran Pori (nm)
1	RBE HCl 20%	5,47561
2	Katalis HCl 20% KOH 25%	5,59481
3	RBE H ₂ SO ₄ 15%	4,22555
4	Katalis H ₂ SO ₄ 15% KOH 20%	-3,47318

Analisis SEM-EDX juga dilakukan pada penelitian untuk mengetahui pengaruh dari perbedaan variasi penambahan KOH pada sampel katalis dilihat dari sisi morfologi sampel yang terbentuk. Hasil analisis morfologi pada katalis padat dengan hasil terbaik (yaitu HCl 20% KOH 25% dan H₂SO₄ 15% KOH 20%) pada perbesaran 10.000 dan 20.000 kali dapat dilihat pada gambar 24 dan gambar 25.



Gambar 24. Hasil Analisa SEM Produk Katalis HCl 20% KOH 25%



Gambar 25. Hasil Analisa SEM Produk Katalis H₂SO₄ 15% KOH 20%

Gambar 25 dan 26 menunjukkan gambar bentuk pori dari produk katalis dengan hasil terbaik yaitu katalis HCl 20% KOH 25% dan H₂SO₄ 15% KOH 20%. Gambar tersebut menunjukkan morfologi dari kedua sampel katalis, dimana terlihat adanya perbedaan bentuk morfologi dari kedua sampel tersebut. Analisis terlihat bahwa produk katalis H₂SO₄ 15% dengan KOH 20% berstruktur seperti kristal berbentuk gumpalan yang tidak beraturan. Produk katalis padat yang telah diproduksi selanjutnya dikarakterisasi dari beberapa parameter, seperti karakterisasi mineral dan uji kinerja katalis padat. Perbandingan komposisi mineral dari raw material dengan produk katalis padat baik yang teraktivasi dengan H₂SO₄ dan HCl terdapat pada Tabel 20 dan Tabel 21.

Tabel 20. Perbandingan Komposisi Mineral dari *Raw material* dengan Produk Katalis Padat (Teraktivasi H₂SO₄ 15%)

Senyawa	Raw Bentonite (%)	Variabel Konsentrasi KOH (%)				
		5%	10%	15%	20%	25%
SiO ₂	69.920	42.533	58.758	32.068	18.427	30.592
K ₂ O	1.030	19.892	21.131	44.456	64.509	59.019
Al ₂ O ₃	19.480	0.000	8.966	0.000	0.000	0.000
CaO	1.875	8.382	0.000	0.000	0.000	0.000
Fe ₂ O ₃	5.661	14.764	6.724	15.118	10.360	6.531

Tabel 21. Perbandingan Komposisi Mineral dari *Raw material* dengan Produk Katalis Padat (Teraktivasi HCl 20%)

Senyawa	Raw Bentonite (%)	Variabel Konsentrasi KOH (%)				
		5%	10%	15%	20%	25%
SiO ₂	69.920	68,764	43,196	33,552	27,221	22,968
K ₂ O	1.030	11,89	33,36	48,48	56,008	61,179
Al ₂ O ₃	19.480	11,138	5,175	0,000	0,000	0,000
CaO	1.875	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Fe ₂ O ₃	5.661	5,441	11,911	10,869	10,190	9,221

Hasil penelitian menunjukkan bahwa katalis padat yang diaktivasi oleh asam dan diimpregnasi oleh KOH mengalami peningkatan kandungan Kalium (K_2O) karena meningkatnya muatan KOH pada katalis. Sampel yang memiliki nilai kalium tinggi adalah katalis padat dengan bahan baku H_2SO_4 15% pada muatan KOH 20% serta katalis padat dengan bahan baku HCl 20% pada muatan KOH 25%. Penelitian yang telah dilakukan menunjukkan bahwa nilai K_2O yang tinggi pada sampel dapat meningkatkan kinerja katalitik untuk produksi biodiesel. Setelah melakukan karakterisasi, selanjutnya dilakukan uji kinerja terhadap katalis padat tersebut. Untuk menyelidiki kinerja katalis padat (*K-impregnated Bleaching Earth*) digunakan katalis dengan persentase kandungan K tertinggi. Katalis digunakan untuk proses transesterifikasi untuk menghasilkan biodiesel dari minyak sawit mentah. Kondisi percobaan untuk mempelajari kinerja katalis pada reaksi transesterifikasi yakni jumlah katalis 9% berdasarkan berat minyak sawit, rasio molar minyak terhadap metanol 1:10, waktu reaksi 120 menit dan suhu reaksi 60 C. Hasil lengkap menunjukkan bahwa jumlah KOH yang dimuat dalam RBE mempengaruhi konversi minyak sawit menjadi biodiesel (82,24%). Peningkatan persentase padatan katalis yang ditambahkan juga meningkatkan yield biodiesel pada waktu reaksi, temperatur, dan rasio metanol tertentu. Rendemen tertinggi (82,24%) diperoleh pada penambahan katalis padat 9%, rasio minyak terhadap metanol 1:10, suhu 45 C selama 120 menit. Dalam menentukan kondisi operasi produksi biodiesel, digunakan metode Taguchi (Tabel 22). Hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan jumlah katalis sebesar 9%, rasio minyak dan metanol sebesar 1:10, suhu proses sebesar 45 C, waktu proses 120 menit menghasilkan *yield* paling tinggi, yakni sebesar 82,24%.

Tabel 22. Pengaruh proses dan variabel yang berbeda terhadap hasil biodiesel (Menggunakan H₂SO₄ 15% KOH 25%)

Amount Catalyst (%)	Oil:Methanol ratio	Temperature (°C)	Time (min)	%yield
3	1:4	45	60	71.96
3	1:6	50	90	67.67
3	1:8	55	120	68.74
3	1:10	60	150	69.98
5	1:4	50	120	68.22
5	1:6	45	150	75.25
5	1:8	60	60	68.32
5	1:10	55	90	67.95
7	1:4	55	150	63.53
7	1:6	60	120	73.34
7	1:8	45	90	72.80
7	1:10	50	60	79.90
9	1:4	60	90	63.26
9	1:6	55	60	66.04
9	1:8	50	150	77.66
9	1:10	45	120	82.24

Untuk melihat perbedaan pengaruh katalis padat terhadap rendemen biodiesel, jumlah katalis selanjutnya ditambahkan dengan beberapa perbandingan antara 3%, 5%, 7% dan 9% berat berdasarkan jumlah minyak sawit. Rendemen biodiesel meningkat dari 63,26% pada katalis 9% RBE/KOH menjadi 82,24% pada katalis 9%. Semakin padat katalis yang ditambahkan maka semakin banyak basa aktif (K₂O) dalam sistem reaksi produksi biodiesel. Salah satu faktor yang mempengaruhi jumlah *yield* biodiesel adalah suhu, waktu reaksi dan jumlah metanol yang ditambahkan, sehingga beberapa hal yang dapat disimpulkan dari penelitian yang telah dilakukan, yakni:

1. *Yield* biodiesel tertinggi dihasilkan dari waktu reaksi 120 menit. *Yield* biodiesel menurun setelah reaksi 120 menit akibat adanya konversi kesetimbangan reaksi yang telah tercapai. Reaksi transesterifikasi dengan metanol merupakan

- reaksi *reversibel*, sehingga untuk merubah reaksi dari kiri ke kanan dapat dilihat dari kesetimbangan reaksi
2. Penelitian transesterifikasi CPO menggunakan katalis padat dilakukan pada suhu berkisar antara 45 sampai 60°C. Berdasarkan suhu reaksi yang digunakan, reaksi transesterifikasi yang dilakukan pada suhu 45°C menghasilkan rendemen tertinggi, dan rendemen terendah dihasilkan pada suhu reaksi 55°C. Hal tersebut juga dipengaruhi oleh lamanya waktu reaksi transesterifikasi.
 3. Pengaruh rasio minyak terhadap metanol sebagai salah satu faktor dalam proses transesterifikasi minyak yang pada penelitian ini dilakukan pada rentang 1:4 sampai 1:10 dengan faktor berat penambahan katalis, suhu, dan waktu yang berbeda. Penambahan metanol dalam reaksi pembentukan biodiesel merupakan salah satu hal yang penting karena dalam satu mol trigliserida akan berinteraksi dengan tiga mol metanol menghasilkan tiga mol FAME dan satu mol gliserol.

Biodiesel yang telah dihasilkan dari penelitian selanjutnya dianalisa untuk mengetahui apakah biodiesel tersebut memenuhi sejumlah standar kualitas. Standar bahan bakar biodiesel di Indoensia terdapat pada SNI 7182:2015. Beberapa parameter yang dianalisa pada penelitian yakni uji densitas, kadar air, bilangan *iodine*, uji setana, dan sebagainya. Densitas merupakan sifat bahan bakar yang penting, karena menunjukkan sistem injeksi pompa dan sebagai injector harus menghasilkan jumlah bahan bakar yang sesuai agar dapat menghasilkan pembakaran yang tepat. Hasil analisis densitas pada penelitian menggunakan piknometer menunjukkan %yield biodiesel tertinggi memiliki densitas sebesar 0,000904 kg/m³.

Kandungan air dalam bahan bakar merupakan aspek penting dari kualitas bahan bakar. Kandungan air dalam bahan bakar dapat diklasifikasikan dalam air bebas, air emulsi dan air laut. Kelarutan air

dalam bahan bakar tergantung pada suhu dan komposisi bahan bakar. Oleh karena itu, sifat higroskopis biodiesel dapat menyebabkan peningkatan kadar air terlarut selama penyimpanan. Biodiesel dapat menyerap lebih banyak uap air dibandingkan dengan minyak diesel karena metil ester asam lemak merupakan senyawa higroskopis sehingga membuat biodiesel jauh lebih hidrofilik daripada diesel pada umumnya. Penyerapan air yang terjadi pada biodiesel biasanya pada saat proses penyimpanan dan bergantung pada suhu dan kelembapan lingkungan. Hal ini dapat menyebabkan peningkatan penyerapan air dari biodiesel yang disimpan yang kemudian menyendap saat suhu turun. Air bebas yang muncul dapat mendorong pertumbuhan biologis dalam tangki penyimpanan sehingga menyebabkan korosi pada logam dan membentuk lumpur atau lendir yang dapat menyebabkan penyumbatan filter bahan bakar dan saluran bahan bakar yang nantinya akan merusak sistem injeksi bahan bakar pada kendaraan. Proses pengeringan biodiesel pada penelitian menggunakan oven biasa sehingga kandungan air pada biodiesel sulit turun dan disarankan menggunakan oven vakum untuk proses selanjutnya.

Bilangan *iodine* merupakan suatu ukuran ketidakjenuhan minyak dan lemak serta turunan asam lemaknya, dan dapat ditentukan dengan berbagai cara. Asam lemak tak jenuh dalam minyak dan lemak dapat menyerap *iodine* dalam jumlah tertentu dan membentuk senyawa jenuh. Banyaknya *iodine* yang terserap, menunjukkan banyaknya ikatan rangkap atau ikatan tidak jenuh dalam minyak tersebut. Ikatan rangkap yang merupakan sumber utama ketidakjenuhan tersebut bereaksi dengan iodium untuk membentuk suatu senyawa kompleks. Semakin banyak ikatan C=C yang ada pada asam lemak, maka semakin besar nilai iodium yang terkandung. Pada penelitian yang dilakukan, kandungan iodium tertinggi sebesar 44.37 (%-masa ($g-I_2/100g$)). Absorpsi iodium terjadi pada titik ketidakjenuhan, sehingga angka *iodine* yang tinggi menunjukkan besarnya ketidakjenuhan yang tinggi. Berdasarkan

SNI, untuk angka iodium memiliki nilai maksimal sebesar 155 (%-masa ($\text{g-I}_2/100\text{g}$)).

Angka saponifikasi juga diamati pada penelitian. Angka saponifikasi menunjukkan jumlah milligram KOH yang diperlukan untuk menyabunkan satu gram minyak atau lemak. Penggunaan katalis padat pada penelitian terhadap reaksi saponifikasi diuntungkan karena pembentukan sabun yang terjadi relatif rendah dan memakan waktu yang lama dalam proses reaksi pembentukannya. Katalis cair seperti alkali hidroksida dan alkali metoksida banyak digunakan di pabrik biodiesel komersial karena proses dengan katalis cair memerlukan sedikit waktu, penggunaan alkohol yang rendah serta dapat tercampur dengan baik dalam reaksi karena memiliki fase yang sama dengan trigliserida. Namun, kedua bahan tersebut dapat menyebabkan terjadinya reaksi saponifikasi dan membutuhkan banyak air dalam proses pencucian biodiesel. Pembentukan sabun merupakan salah satu alasan rendemen biodiesel menurun. Tingginya kandungan asam lemak bebas dan kadar air pada biodiesel dapat menyebabkan terjadinya pembentukan sabun. Hasil analisis angka penyabunan pada penelitian didapatkan nilai tertinggi sebesar 129,5 mgKOH/minyak dan nilai terendah sebesar 112,9 mgKOH/minyak.

Selain angka saponifikasi, indikator kualitas bahan bakar diesel lainnya dapat dilihat dari angka setana. Angka setana mengukur kesiapan bahan bakar untuk dapat menyala sendiri saat diinjeksi. Komposisi bahan bakar dapat mempengaruhi stabilitas mesin, tingkat kebisingan serta emisi gas buangan. Angka setana yang ditentukan oleh uji standar ASTM D613 (mesin diesel) merupakan ukuran kualitas nyala bahan bakar diesel dalam mesin penyalan kompresi. Bahan bakar yang memiliki angka setana yang lebih tinggi memiliki waktu pembakaran yang lebih pendek dan dapat memulai pembakaran secara cepat setelah diinjeksi kedalam ruang pembakaran. Sementara lamanya waktu pembakaran pengoperasian angka setana bergantung pada komposisi kimiawi suatu bahan

bakar. Angka setana biodiesel umumnya memiliki nilai lebih tinggi dibandingkan dengan bahan bakar solar standar. Bilangan setana berdasarkan spesifikasi biodiesel EN 14214 dan menurut standar nasional Indonesia SNI 7182:2015 nilai yang diizinkan di atas 51. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa angka setana tertinggi yang dimiliki oleh biodiesel sebesar 87,86, sedangkan yang terendah sebesar 80,72.

Selain melakukan karakterisasi dan produksi, penelitian juga telah melakukan perhitungan kelayakan ekonomi yang ditinjau dari *return on investment* (ROI) dan *payback period* (PBP). Penelitian yang dilakukan membandingkan kelayakan ekonomi reaktivasi SBE di *new plant* (RBE NP), RBE-Ba di *new plant* (RBE-Ba NP), dan RBE di *new factory* (RBE NF). Dalam skema *new plant* (NP), diasumsikan tidak memerlukan biaya untuk membeli lahan dan membangun gedung baru untuk kantor, sehingga pabrik yang ada diasumsikan memiliki cadangan lahan yang cukup untuk membangun pabrik baru. Perbedaan biaya kimia awal karena RBE-Ba harus membeli BaCl₂. Biaya kontraktor diasumsikan 10% dari DC dan IC. Bahan baku yang paling mahal adalah BaCl₂, meskipun dapat direcovery. Dalam RBE NF, biaya SBE berasal dari biaya pengangkutan SBE ke pabrik baru. Pengeluaran tenaga kerja dalam skema NP lebih kecil dari NF, karena hanya membutuhkan 3 operator baru, sedangkan untuk RBE NF membutuhkan minimal 15 orang, yang terdiri dari manager pabrik, insinyur proses, *marketing*, staf administrasi, dan operator. Dalam skema NP, tidak ada biaya untuk laboratorium dan R&D karena diasumsikan dapat menggunakan fasilitas yang sudah ada. Skema NF membutuhkan biaya pemasaran karena harus menjual produknya kepada konsumen, sedangkan NP menggunakan semua produknya untuk kebutuhannya sendiri. Basis perhitungan kelayakan ekonomi yang digunakan pada penelitian terdapat pada Tabel 23, estimasi *Total Capital Investment* (TCI) dapat dilihat pada tabel 24, dan estimasi *Total Production Cost* (TPC) pada Tabel 25. Biaya peralatan proses dihitung menggunakan persamaan 1.

$$C = C_b \times \left(\frac{Q}{Q_b}\right)^{0.7} \quad (1)$$

Keterangan :

C = biaya peralatan dengan ukuran yang diinginkan

C_b = biaya peralatan yang dijadikan basis desain (USD 235.822)

Q = kapasitas peralatan yang diinginkan (1136,84 ton/tahun)

Q_b =kapasitas peralatan yang dijadikan basis desain (664,62 ton/tahun)

Tabel 23. Basis analisis ekonomi

	RBE	RBE-Ba
Pengolahan SBE/ <i>batch</i> (kg) :	250	250
Waktu proses/ <i>batch</i> (min) :	95	120
<i>Batch</i> /hari (<i>batch</i>) :	15.16	12
Pengolahan SBE/hari (ton) :	3.79	3.00
Pengolahan SBE/tahun (ton) :	1136.84	900
Rasio SBE terhadap heksana (m/v) :	1 : 2	1 : 2
Rasio SBE terhadap HCl 10% (m/v) :	1 : 5	1 : 5
Rasio SBE terhadap BaCl ₂ 5% (m/v) :	-	1 : 5
Recovery heksana/ <i>batch</i> :	98%	98%
Recovery HCl 10%/ <i>batch</i> :	90%	90%
Recovery BaCl ₂ :	-	90%
Persentase minyak yang diekstrak :	91%	91%
Harga heksana/liter :	USD1,80	USD1,80
Harga HCl 32%/liter :	USD1,20	USD1,20
Harga BaCl ₂ /kg :	-	USD16,67
Potensi energi minyak recovery/ton/tahun :	Rp 350	Rp 350

Tabel 24. Estimasi Total Capital Investment (TCI)

	Asumsi	RBE NP (USD)	RBE-BA NP (USD)	RBE NF (USD)
<i>Direct cost (DC)</i>				
Peralatan dan ekspedisi (E)	110% C	377,718	320,736	377,718
Biaya instalasi	21% E	79,321	67,355	79,321
Instrumentasi & kontrol	12% E	45,326	38,488	45,326
Perpipaan dan listrik	13% E	49,103	41,696	49,103
Yard improvement	10% E	37,772	32,074	37,772
Land	6% E	-	-	22,663
Bangunan & pemeliharaan	22% E	-	-	83,098
Biaya kimia awal		2,400	3,667	2,400
Total DC		591,640	504,015	697,402
<i>Indirect cost (IC)</i>				
Engineering & supervision	15% E	56,658	48,110	56,658
Construction	30% E	113,315	96,221	113,315
Total IC		169,973	144,331	169,973
Biaya kontraktor	10% DC+IC	76,161	64,835	86,737
Fix Capital Investment		837,775	713,181	954,112
Working capital (15% TCI)		147,843	125,855	168,373
Total Capital Investment (TCI)		985,618	839,036	1,122,485

Tabel 25. Estimasi Total Production Cost (TPC)

	Asumsi	RBE NP (USD/tahun)	NP RBE-Ba (USD/tahun)	RBE NF (USD/tahun)
Direct Manufacturing Cost (DMC)				
Bahan baku				
SBE (Transportasi)		-	-	75,789
N-Heksana		81,853	64,800	81,853
HCl 32%		213,158	168,750	213,158
BaCl ₂		-	375,000	-
Labor (L)		7,200	7,200	46,400
Maintenance (M)	2% FCI	16,756	14,264	19,082
Plant Supplies	15% M	2,513	2,140	2,862
Utilitas	10% S	37,895	30,000	37,895
Jumlah DMC		359.374	662.153	477.039
Indirect Manufacturing Cost (IMC)				
Payroll overhead	15% L	1,080	1,080	6,960
Laboratorium	10% L	-	-	4,640
Plant overhead	50% L	-	-	23,200
Jumlah IMC		1,080	1,080	34,800
Fixed Manufacturing Cost (FMC)				
Penyusutan peralatan	10% PE	34,338	29,158	34,338
Pajak properti	1% FCI	8,378	7,132	9,541
Asuransi	1% FCI	8,378	7,132	9,541
Total FMC		51,094	43,421	53,420
Total MC = DMC + IMC + FMC		4 11.548	706,655	565.260
General Expenses (GE)				
Biaya administrasi	3% MC	12.346	21,200	16.958
Biaya Pemasaran	5% MC	-	-	28.263
Biaya R&D	3,5% MC	-	-	19.784
Jumlah GE		12.346	2 1,2 00	65.005
TPC Tahunan = MC +GE		423,894	727.854	630,264

Nilai S (*sales*) diasumsikan sebagai harga produk RBE yakni USD 0,33/kg. Setelah FCI dan TPC diperoleh, langkah selanjutnya adalah menganalisis kelayakan ekonomi menggunakan *return on investment* (ROI) dan *payback period* (PBP) menggunakan persamaan 2 dan 3.

$$ROI = \frac{\text{Profit}}{\text{FCI}} \times 100\% \quad (2)$$

$$PBP = \frac{\text{FCI}}{\text{Profit} + (0.1 \times \text{FCI})} \quad (3)$$

Hasil evaluasi ROI dan PBP untuk skema RBE NP, RBE-Ba NP, dan RBE NF disajikan pada Tabel 6. NP RBE memiliki laba bersih tertinggi (USD 175.714 per tahun) dibandingkan dengan RBE-Ba NP dan RBE NF. ROI skema adalah 20,97% (min 10%) dan PBP 3,23 tahun (maks 5 tahun). Berdasarkan analisis ekonomi, NP RBE layak untuk dikaji lebih lanjut. Perbandingan analisis ekonomi RBE dan RBE-Ba dapat dilihat pada Tabel 26.

Tabel 26. Perbandingan analisis ekonomi RBE dan RBE-Ba

Benda	RBE NP	RBE-Ba NP	RBE NF
FCI (USD)	837,775	713,181	954,112
TPC (USD/tahun)	423,894	727,854	630,264
Pendapatan (USD/tahun)			
Menghindari pembelian BE	378,947	300,000	378,947
Menghindari pembuangan SBE	75,789	60,000	0
Energi potensial dari sisa minyak	144,871	114,689	144,871
Laba bersih (USD/tahun)	175,714	-253.165	-263.592
ROI (%)	20,97	-35. 50	-27. 63
PBP (tahun)	3.23	-3. 92	-5. 67

RBE NP memiliki dampak positif terhadap lingkungan dibandingkan dengan pengolahan tradisional seperti penimbunan, pembakaran, kompos dan skema lainnya. Pembuangan SBE dengan cara penimbunan menyebabkan pencemaran sekunder karena kandungan minyak dapat mencemari sumber air dan tanah, pembakaran menyebabkan emisi NO_x, SO_x, dan *fly ash*, dan pengomposan membuat logam berat menjadi lebih terkonsentrasi jika bahan organik tidak dapat terurai sempurna [26]. Kandungan silika dalam SBE dapat meningkatkan risiko paparan bahan kimia berbahaya. Biasanya pengangkutan SBE menggunakan *open dump truck* yang berisiko SBE terjatuh atau terbawa angin. LCA *refinery* minyak sawit dan fraksinasi dilakukan dengan menunjukkan bahwa reaktivasi SBE berkontribusi untuk membuat lingkungan menjadi lebih baik dengan mengurangi emisi GRK, ionisasi radiasi, pembentukan PM 2.5, pengasaman terestrial dan ekotoksisitas.

DAFTAR PUSTAKA

- Arpornpong, N., Charoensaeng, A., Khaodhiar, S., & Sabatini, D. A. (2018). Formulation of microemulsion-based washing agent for oil recovery from spent bleaching earth-hydrophilic lipophilic deviation concept. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 541, 87-96.
- Aznury, M. (2022). Analisis Penggunaan Limbah B3 Spent Bleaching Earth Sebagai Bahan Bakar Alternatif di PT. Semen Baturaja (PERSERO) TBK: Limbah B3, Spent Bleaching Earth (SBE), Bahan Bakar Alternatif, Rotary Kiln, Clinker. *KINETIKA*, 13(03), 49-55.
- Bachmann, S. A. L., Valle, R. D. C. S. C., Vegini, A. A., & Tavares, L. B. B. (2020). Determination of optimum conditions for thermal regeneration and characterization of a spent bleaching earth. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8 (2), 103503.
- Beshara, A., & Cheeseman, C. R. (2014). Reuse of spent bleaching earth by polymerisation of residual organics. *Waste management*, 34(10), 1770-1774.
- Boey, P. L., Saleh, M. I., Sapawe, N., Ganesan, S., Maniam, G. P., & Ali, D. M. H. (2011). Pyrolysis of residual palm oil in spent bleaching clay by modified tubular furnace and analysis of the products by GC-MS. *Journal of analytical and applied pyrolysis*, 91(1), 199-204.

- Chanrai, N. G dan Burde, S.G. (2004). Recovery oil from spent bleaching earth. US Patent. US 6780321 B2. New Jersey (US): T.H.F Publication Inc.
- Crocker, J., Poss, R., Hartmann, C., & Bhuthorndharaj, S. (2004). Effects of recycled bentonite addition on soil properties, plant growth and nutrient uptake in a tropical sandy soil. *Plant and Soil*, 267(1-2), 155-163.
- Damarani, Z. N., Sholihah, L. M., Zullaikah, S., & Rachimoellah, M. (2019). Pra Desain Pabrik Refined Bleached Deodorized (RBD) Olein dari Crude Palm Oil (Oil). *Jurnal Teknik ITS*, 8(1), F51-F55.
- Devine, J., and Williams, P. N. (1961). *The chemistry and technology of edible oils and fats*. Pergamon Press. London. 154 pp.
- Ditjen Industri Agro, Kementrian Perindustrian. (2020). Analisis tantangan-peluang industri hilir minyak kelapa sawit ditengah pandemic Covid-19. Webinar "Steering The Indonesian Palm Oil Industry Out Of The Pandemic", 25 Juni 2020.
- Ditjen PSLB3, KLHK. (2020). Siraja limbah. <http://plb3.menlhk.go.id/siraja-limbah-2019/login/index/app/siraja>
- GAPKI, Gabungan Pengusaha Kelapa Sawit Indonesia. (2017). Strategi dan kebijakan pengembangan industri hilir minyak sawit Indonesia. <https://gapki.id/news/2422/strategi-dan-kebijakan-pengembangan-industri-hilir-minyak-sawit-indonesia>
- Ho, S.P., S.T. Yuan, S.H. Jien, and Z.Y. Hseu. (2010). Elucidating the process of co- composting of biosolids and spent activated clay. *Bioresource Technology* 101 (21), 8280-8286.
- Humas EBTKE. (2022). Pengembangan Biodiesel di Indonesia Beri Manfaat Nyata. <https://ebtke.esdm.go.id/post/2022/03/24/3127/pengembangan.biodiesel.di.indonesia.beri.manfaat.nyata>

- Irawan, B., & Soesilo, N. I. (2021). Dampak kebijakan hilirisasi industri kelapa sawit terhadap permintaan CPO pada industri hilir. *Jurnal Ekonomi & Kebijakan Publik*, 12(1), 29-43.
- Ketaren, S. (1986). *Pengantar teknologi minyak dan lemak pangan*. UI Press, Jakarta.
- Kheang, L. S., Foon, C. S., May, C. Y., & Ngan, M. A. (2006). A study of residual oils recovered from spent bleaching earth: their characteristics and applications. *American Journal of Applied Sciences*, 3(10), 2063-2067.
- Kristanti, A. N. (Ed.). (2019). *Fitokimia*. Airlangga University Press.
- Krisyanti, S., and Sukandar. (2011). Recovery minyak dari limbah bahan berbahaya dan beracun (B3) Spent Bleaching Earth dengan metode ekstraksi pelarut. *Jurnal Teknik Lingkungan* 17:35.
- Kusnandar, V. B. (2022). Ekspor Biodiesel Indonesia Capai 180 Ribu Ton pada 2021. <https://databoks.katadata.co.id/datapublish/2022/04/26/ekspor-biodiesel-indonesia-capai-180-ribu-ton-pada-2021>
- Kusnandar, V. B. (2022). Ekspor Minyak Kelapa Sawit Indonesia Susut 20% Periode Januari-Agustus 2022. <https://databoks.katadata.co.id/datapublish/2022/10/31/ekspor-minyak-kelapa-sawit-indonesia-susut-20-periode-januari-agustus-2022>.
- Lara, P. V., & Park, E. Y. (2004). Potential application of waste activated bleaching earth on the production of fatty acid alkyl esters using *Candida cylindracea* lipase in organic solvent system. *Enzyme and Microbial Technology*, 34(3-4), 270-277.
- Loh, S.K., Cheng, S.F., Choo, Y.M., Ma, A.N. (2006). A study of residual oils recovered from spent bleaching earth: their characteristics and applications. *Am. J. Appl. Sci.* 3 (10), 2063-2067.

- Loh, S. K., James, S., Ngatiman, M., Cheong, K. Y., Choo, Y. M., & Lim, W. S. (2013). Enhancement of palm oil refinery waste–Spent bleaching earth (SBE) into bio organic fertilizer and their effects on crop biomass growth. *Industrial crops and products*, 49, 775–781.
- Loh, S. K., Cheong, K. Y., Choo, Y. M., & Salimon, J. (2015). Formulation and optimisation of spent bleaching earth-based bio organic fertiliser. *Journal of Oil Palm Research*, 27(1), 57–66.
- Mahmud, S. F. (2019). Proses Pengolahan CPO (Crude Palm Oil) menjadi RBDPO (Refined Bleached and Deodorized Palm Oil) di PT XYZ Dumai. *Jurnal Unitek*, 12(1), 55–64.
- Mahmud, J., & Prihawantoro, S. (2019). Outlook Teknologi Pangan 2019: Teknologi Industri Pangan Berbasis Minyak Sawit. Pusat Pengkajian Industri Proses Dan Energi. Badan Pengkajian Dan Penerapan Teknologi.
- Mana, M., Ouali, M. S., de Menorval, L. C., Zajac, J. J., & Charnay, C. (2011). Regeneration of spent bleaching earth by treatment with cethyltrimethylammonium bromide for application in elimination of acid dye. *Chemical Engineering Journal*, 174(1), 275–280.
- Matupalesa, A., Naully, Y. D., & Fanani, I. (2019). Hilirisasi industri sawit di Sumatera Utara. *Jurnal Perspektif Bea dan Cukai*, 3(1).
- Merikhy, A., Heydari, A., Eskandari, H., & Nematollahzadeh, A. (2019). Revalorization of spent bleaching earth a waste from vegetable oil refinery plant by an efficient solvent extraction system. *Waste and Biomass Valorization*, 10(10), 3045–3055.
- Musa, M. L., Mat, R., & Abdullah, T. A. T. (2018). Catalytic conversion of residual palm oil in Spent Bleaching Earth (SBE) by HZSM-5 Zeolite based-Catalysts. *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis*, 13(3), 456–465.
- Nurasiah, E. S. (2010). Pengoptimuman ekstraksi andrografolida dari sambiloto dengan rancangan fraksional faktorial.

- Oladosu, W. A., Manan, Z. A., & Alwi, S. W. (2017). Recovery of vegetable oil from spent bleaching earth: state-of-the-art and prospect for process intensification. *Chemical Engineering Transactions*, 56, 133-138.
- Pasaribu, K. F. Sukandar.(2017). Analisis manfaat biaya pengelolaan limbah spent bleaching earth melalui pemanfaatan dan penimbunan dengan memperhitungkan nilai gas rumah kaca. *Jurnal Teknik Lingkungan*, 23(2), 33-42.
- Pollard, S.J.T., C.J. Sollars, dan R. Perry. (1993). The reuses of spent bleaching earth: a feasibility study in waste minimisation for the edible oil industry. *Bioresource Technology*45; 53-58.
- Riansyah, R., Gofar, N., & Fitri, S. N. A. (2017). Pengaruh berbagai konsentrasi bakteri lipolitik (*Bacillus cereus*) terhadap populasi bakteri dalam proses bioremediasi limbah SBE (*Spent Bleaching Earth*). Doctoral dissertation. Sriwijaya University.
- Riyanto, A. (1992). *Bahan galian industri bentonit*. PPTM, Bandung.
- Saputra, A. B., Yusnimar, S., & Ida, Z. (1999). Recovery minyak dari spent bleaching earth (SBE).
- Sharma, R., Chisti, Y., & Banerjee, U. C. (2001). Production, purification, characterization, and applications of lipases. *Biotechnology advances*, 19(8), 627-662.
- Siami, L., Indrawati, D., Tazkiaturrizki, T., Dewi, R. A. K., & Dwiana, A. (2021). Potensi Limbah B3 Spent Blaching Earth sebagai Bahan Bakar pada Industri Minyak Goreng PT. ABC. *Jurnal Penelitian dan Karya Ilmiah Lembaga Penelitian Universitas Trisakti*, 6(1), 9-16 Tim Riset PASPI. (2018).
- Sawit dan Kebijakan Industrialisasi Sawit emmu 2050.
<https://gapki.id/news/3209/sawit-dan-kebijakan-industrialisasi-sawit-menuju-2050>.
- Sudrajat, D., Mulyana, N., & Tri Retno, D. L. (2015). Isolasi dan aplikasi mikroba indigen pendegradasi hidrokarbon dari tanah tercemar minyak bumi. *Prosiding pertemuan dan Presentasi Ilmiah-BATAN*.

- Sutopo, I. L. (2007). *Perubahan sifat kimia bentonit asal karangnunggal, tasikmalaya pada proses pembuatan bleaching earth dengan aktivasi asam*. Institut Pertanian Bogor. Bogor.
- Utami, S., & Indrasti, N. S. (2020). Pemulihan Minyak Sawit Dari Spent Bleaching Earth Dengan Metode Ekstraksi Refluks. *Journal of Agroindustrial Technology*, 30(1).
- Wahyudi, M. Y. (2000). *Studi penggunaan kembali bleaching earth bekas sebagai adsorben dalam proses refining CPO*. Bandung (ID). Program Studi Teknik Lingkungan, Institut Teknologi Bandung.
- Weng, C. H., & Pan, Y. F. (2007). Adsorption of a cationic dye (methylene blue) onto spent activated clay. *Journal of Hazardous Materials*, 144 (1-2), 355-362.

BIODATA PENULIS SBE



Dr. Julfi Restu Amelia, S.T.P., M.Si.

Dosen Program Studi Teknologi Pangan, Fakultas Teknologi Pangan dan Kesehatan, Universitas Sahid. Riwayat pendidikan yang telah ditempuh S1 di Teknologi Hasil Pertanian, Universitas Lampung, S2 di Teknologi Industri Pertanian, Universitas Lampung, dan S3 di Teknologi Industri Pertanian, Institut Pertanian Bogor. Beberapa penelitian yang telah dilakukan yaitu Karakterisasi dan Analisis Pemanfaatan Spent Bleaching Earth, Hasil Samping Proses Pemurnian Minyak Sawit, Untuk Mengurangi Beban Lingkungan dan Meningkatkan Citra Unggul Industri Sawit - Badan Pengelola Dana Perkebunan Kelapa Sawit (BPDPKS), Pengelolaan Limbah B3, Spent Bleaching Earth (SBE) Secara Recovery - Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK), Detail Engineering Design Kegiatan Evaluasi Sistem Konversi Fasilitas Pemanfaatan Energi Biomassa Untuk Energi - Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK), dan sebagainya.



Dr. Eng. Dewi Agustina Iryani, S.T., M.T.

Dosen Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Lampung. Riwayat pendidikan yang telah ditempuh S1 di Teknik Kimia, Universitas Syiah Kuala, S2 di Teknik Kimia, Institut Teknologi Bandung, S3 di Teknik Kimia, Kyushu University, Japan. Beberapa penelitian yang telah dilakukan yaitu Karakterisasi dan Analisis Pemanfaatan Spent Bleaching Earth, Hasil Samping Proses Pemurnian Minyak Sawit, Untuk Mengurangi Beban Lingkungan dan Meningkatkan Citra Unggul Industri Sawit-Badan Pengelola Dana Perkebunan Kelapa Sawit (BPDPKS), Biorefinery Design of Integrated Palm Industry Waste for Biomethane Upgrading and Microalga Cultivation - Universitas Lampung, *Black pellet* Tandan Kosong Kelapa Sawit Sebagai Bahan Baku Proses Gasifikasi : Peningkatan Mutu Biomassa melalui Torefaksi COMB (*Counter Flow Multi-Baffle*) Pyrolyzer - Badan Pengelola Dana Perkebunan Kelapa Sawit (BPDPKS), dan sebagainya.



Prof. Dr. Eng. Ir. Udin Hasanudin, M.T.

Guru Besar bidang Pengelolaan Limbah Agroindustri di Program Studi Teknologi Industri Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung. Riwayat pendidikan yang telah ditempuh S1 di Teknologi Industri Pertanian, Institut Pertanian Bogor, S2 di Teknik Kimia, Institut Teknologi Bandung, dan S3 di Environmental and Life Engineering, Toyohashi University of Technology, Japan. Beberapa penelitian yang telah dilakukan yaitu Food Processing Residues to Climate Smart Food via Edible Filamentous Fungi (University of Borås, Swedia), Technology Development of Sap Extraction from Oil Palm Trunk (Toyota Motor Corporation, Japan), Investigation on Biomass Waste Resources Potential, Case Study on Waste to Energy in Agroindustry (Green Technology Center, Korea), dan sebagainya.



Ir. Ribut Sugiharto, M.Sc. Dosen Jurusan Teknologi Hasil Pertanian Fakultas Pertanian, Universitas Lampung. Riwayat pendidikan yang telah ditempuh S1 di Teknologi Hasil Pertanian, Universitas Lampung, dan S2 di University of Illinois at Urbana-Champaign. Beberapa penelitian yang telah dilakukan yaitu Karakterisasi dan Analisis Pemanfaatan Spent Bleaching Earth, Hasil Samping Proses Pemurnian Minyak Sawit, Untuk Mengurangi Beban Lingkungan dan Meningkatkan Citra Unggul Industri Sawit -Badan Pengelola Dana Perkebunan Kelapa Sawit (BPDPKS), Produksi Biosolar dari Spent Bleaching Earth (SBE) Secara Transeterifikasi In Situ - PPT DIKTI, *Reactivated Bleaching Earth* sebagai Adsorben pada Proses Pemucatan *Crude Palm Oil*, dan sebagainya.



Simparmin Br Ginting, S.T., M.T. Dosen Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Lampung. Riwayat pendidikan yang telah ditempuh S1 di Teknik Kimia, Universitas Syiah Kuala dan S2 di Teknik Kimia Institut Teknologi Bandung. Beberapa penelitian yang telah dilakukan yaitu Karakterisasi dan Analisis Pemanfaatan Spent Bleaching Earth, Hasil Samping Proses Pemurnian Minyak Sawit, Untuk Mengurangi Beban Lingkungan dan Meningkatkan Citra Unggul Industri Sawit - Badan Pengelola Dana Perkebunan Kelapa Sawit (BPDPKS), Modifikasi Zeolit Alam Lampung (ZAL) Dengan Tungsten Trioksida (WO_3) Sebagai Adsorben-Fotokatalitik Untuk Degradasi Limbah Zat Warna Metilen Biru - Universitas Lampung, Pemanfaatan Adsorben Arang Serbuk Gergaji Kayu dan Arang Sekam Padi Teraktivasi Fisik Menggunakan Oven dan Microwave Untuk Menghemat Konsumsi Bahan Bakar Dan Mereduksi Emisi Gas Buang Motor Bensin 4-Langkah - Universitas Lampung, Sintesis Adsorben Zeolit LTA Murah Dari Zeolit Alam Lampung (ZAL) Teraktivasi Untuk Pemurnian Bioetanol Menjadi Biofuel Grade Ethanol - Universitas Lampung, dan sebagainya.



Lathifa Indraningtyas, S.TP. M.Sc. Dosen Program Studi Teknologi Industri Pertanian, Jurusan Teknologi Hasil Pertanian Universitas Lampung. Riwayat pendidikan yang telah ditempuh S1 di Jurusan T eknologi Hasil Pertanian, Universitas Lampung, S2 Jurusan Teknologi Industri Pertanian, Universitas Gadjah Mada. Beberapa penelitian yang telah dilakukan yaitu Karakterisasi dan Analisis Pemanfaatan Spent Bleaching Earth, Hasil Samping Proses Pemurnian Minyak Sawit, Untuk Mengurangi Beban Lingkungan dan Meningkatkan Citra Unggul Industri Sawit - Badan Pengelola Dana Perkebunan Kelapa Sawit (BPDPKS), Pemanfaatan Limbah Ampas Kopi Bubuk sebagai Adsorben Logam Berat pada Perairan, Produksi Pati Nanopartikel Asal Umbi Porang dan Aplikasinya sebagai Bioplastik, dan sebagainya.

