

ISSN: 2301-7112



SIMETRI

Jurnal Ilmu Fisika Indonesia

Volume 2 Nomor 3 Mei 2016

SIMETRI; **Jurnal Ilmu Fisika Indonesia** merupakan wahana komunikasi ilmiah di bidang fisika yang diangkat dari hasil penelitian, survei, atau telaah pustaka baik teoretis, eksperimen, maupun aplikatif. Jurnal ini diterbitkan mulai Mei 2012 oleh Himpunan Fisika Indonesia Wilayah Barat (Konsorsium Jurusan Fisika BKS-PTN Wilayah Barat), dan terbit berkala setiap 4 bulan sekali, yaitu pada bulan Mei, Agustus, dan Januari.

Penyelia dan Mitra Bestari:

Dr.rer.nat. M. Farchani Rosyid (Fisika Matematika - UGM); Mirza Satriawan, M.Si., Ph.D. (Quantum Statistics - UGM); Dr. Agus Purwanto, M.Sc. (Fisika Partikel - ITS); Dr. A. Aminuddin Bama, M.Si. (Teori Kuantum & Fisika Matematika - UNSRI); Dr. Supardi, M.Si. (Fisika Teori Medan - UNSRI); Azrul Azwar, M.Si. (Fisika Teori - UNTAN).

Prof. Agus Setyo Budi, Ph.D. (Fisika Material Glass & Ceramic - UNJ); Ismail, Ph.D. (Teori dan Material - UNSYIAH); Dra. Dwi Asmi, M.Si., Ph.D. (Fisika Material - UNILA); Dr. Fitri S. A., M.Si. (Nano-material - UNSRI); Dr. Mursal, M.Si. (Material, Sel Surya - UNSYIAH); Satwiko Sidopekso, Ph.D. (Sel Surya - UNJ).

Dr.rer.nat Bambang Heru I., M.Si. (Fisika Komputasi & Instrumentasi - UNJ); Dr. Adi Rahwanto, M.Eng.Sc. (Optoelektronik, Komunikasi Optik - UNSYIAH); Dr. Syarun Nur, M.Si. (Laser Spektroskopi - UNSYIAH); Dr. Mangasi Alion Marpaung, M.Si. (Opto Electronics - UNJ); Dr. Menik Ariani, M.Si. (Elektronika Instrumentasi - UNSRI).

Dr. Dedi Setiabudidaya (Paleomagnetik - UNSRI); Dr. Azhar Kholiq A., M.S. (Hidrologi - UNSRI); Dr. Iskhaq Iskandar, M.Sc. (Fisika Kelautan & Lingkungan - UNSRI); Nazli Ismail, Ph.D. (Geofisika - UNSYIAH); Dr. M. Yusup N. K., M.Si. (Geofisika Eksplorasi - UNSRI); Sutrisno, M.Si. (Fisika Material Kebumihan - UIN Syarif Hidayatullah); Andi Ihwan, M.Si. (Sains Atmosfir dan Geofisika - UNTAN).

Dr. I. Made Astra, M.Si. (Termodinamika - UNJ); Dr. Sunaryo, M.Si. (Fisika Lingkungan - UNJ); Muh. Ishak Jumarang, M.Si. (Fisika Kelautan - UNTAN).

Prof. Dr.Yety Supriyati, M.Pd.; Evaluasi Pendidikan (UNJ)

Penerbit : Himpunan Fisika Indonesia (HFI) Wilayah Barat (Konsorsium Jurusan Fisika BKS-PTN Wilayah Barat)

ISSN : 2301-7112

Penasehat : Arsali, Pradanto P. P.

Pimpinan Redaksi : Akhmad Aminuddin Bama

Pelaksana Redaksi : Hadi

Bendahara : Ramlan

Staf Redaksi : M. Fuad, Marwansyah, Effendi M. Z.

Alamat Redaksi : Jurusan Fisika FMIPA UNSRI, Kampus Universitas Sriwijaya, Jalan Raya Palembang-Prabumulih Km 32, Ogan Ilir, Sumatera Selatan, Telp. 0711-580268, Faks. 0711-580056. Homepage: <http://jsimetri.wordpress.com>; Email: jsimetri@yahoo.com; akhmadbama@yahoo.com

Redaksi menerima sumbangan tulisan yang belum pernah diterbitkan sebelumnya oleh penerbit lain. Naskah ditulis dalam Bahasa Indonesia atau Inggris yang baik dan benar, tidak mengandung unsur politik, komersialisme, atau subjektifitas yang berlebihan.

Dari Redaksi

Syukur Alhamdulillah, meskipun dengan berbagai kendala yang terkait dengan pendanaan, Jurnal SIMETRI Volume 2 Nomor 3 Mei 2016 dapat terbit. Terkait dengan kendala itu, Redaksi mohon maaf (khususnya kepada para Pemakalah) atas keterlambatan terbitan edisi kali ini. Tak lupa, kami mengucapkan terima kasih kepada para Pemakalah yang telah berkenan makalahnya diterbitkan dalam jurnal edisi kali ini.

Perlu kami informasikan bahwa makalah yang terbit pada edisi ini merupakan makalah terseleksi dari sekitar 150 makalah yang telah diseminarkan pada acara SEMIRATA BKS PTN Wilayah Barat pada bulan Mei 2016.

Ke depannya, kami berusaha untuk dapat merutinkan penerbitan ini dan sekaligus dapat meningkatkan mutu serta kredibilitas Jurnal SIMETRI.

Redaksi

Aturan Penulisan Makalah untuk Jurnal SIMETRI

Demi kelancaran proses pengeditan makalah yang hendak diterbitkan dalam SIMETRI; Jurnal Ilmu Fisika Indonesia, berikut disajikan aturan yang harus dipenuhi bagi para penulis makalah yang telah dinyatakan layak terbit oleh penyelia:

1. Naskah usulan diketik rapi dengan program pengolah-kata \LaTeX (TeX) atau Ms. Word (disarankan untuk menggunakan \LaTeX (TeX) bagi yang sudah familiar). Pada tahap usulan, naskah tidak harus disertai *soft-copy*.
2. Bagi pengguna \LaTeX , telah tersedia makro dalam bentuk file “**jsimcls.cls**” dan “**templatejs.tex**” yang dapat diunduh di <http://jsimetri.wordpress.com>
3. Bagi pengguna Ms. Word, naskah usulan harap diketik dengan format berikut:
 - (a) Ukuran kertas A4, huruf standar (Times New Roman, Arial, atau Courier New) 12 pt, spasi satu, satu kolom, rata kiri (termasuk judul, nama penulis, seksi, dsb.).
 - (b) Pergantian alinea (paragraf) ditandai dengan kelang satu baris dan kalimat pertamanya menjorok.
 - (c) Penulisan rumusan (matematis) harus jelas (biasanya menggunakan “**equation editor**”).
4. Makalah disusun dengan sistematika sebagai berikut:
 - (a) Judul makalah (huruf besar-kecil)
 - (b) Nama penulis pertama, penulis ke-dua, dst. (tanpa gelar)
 - (c) Nama lembaga tempat penulis pertama, ke-dua, dst.
 - (d) Intisari (maks. 200 kata), Kata kunci (3 - 5 kata) (Bahasa Indonesia)
 - (e) Abstract (maks. 200 kata), Keywords (3 - 5 kata) (Bahasa Inggris)
 - (f) E-mail penulis pertama dan atau ke-dua
 - (g) Tanggal naskah diusulkan
 - (h) Pendahuluan
 - (i) Isi makalah, disesuaikan dengan jenis makalah
 - (j) Simpulan
 - (k) Ucapan terima kasih (jika ada)

- (l) **Daftar pustaka, disusun sesuai dengan urutan keluarnya di dalam naskah, bukan** berdasarkan urutan abjad (alfabetik).

Contoh penulisan Daftar Pustaka:

(untuk acuan buku)

Greiner, W., L. Neise, dan H. Stocker, 1995, *Thermodynamics and Statistical Mechanics*, Springer Verlag, New York

(untuk acuan jurnal)

Chaturvedi, S., R.H. McKenzie, P.K. Panigrahi, dan V. Srinivasan, 1997, Equivalence of the Grand Canonical Partition Functions of Particles with Different Statistics, *Mod. Phys. Lett. A*, vol. 12, hal. 1095-1099

- (m) Lampiran (jika ada)

5. Setiap makalah harus disertai biodata singkat, yang berisi Nama, Instansi, Alamat Instansi, Alamat Rumah, No. Kontak, Email., Judul Makalah, Jenis Bidang Ilmu (terkait dengan makalah, misalnya Fisika Nuklir, Fisika Teori, Nanomaterial, dsb.).
6. Makalah dikirimkan via e-mail ke akhmadbama@yahoo.com atau dikirim langsung ke:

Redaksi SIMETRI; Jurnal Ilmu Fisika Indonesia

d. a. Jurusan Fisika FMIPA Universitas Sriijaya, Jl. Raya Palembang-Prabumulih Km.32 Indralaya, OI, Sumatera Selatan (30662).



DAFTAR ISI

Pengaplikasian Metode Fungsi Airy pada Permasalahan Probabilitas Terobosan Kuantum FANDI OKTASENDRA	2313-75
Singularitas Ruang-Waktu Bermetrik Kerr dan Kerr-Newman dalam Teori Relativitas Umum LENI RUMIYANTI DAN MUHAMMAD FARCHANI ROSYID	2314-81
Pengembangan Prototipe Rumah DC UNPAD Sebagai Solusi Penyediaan Listrik Pedesaan MOHAMMAD TAUFIK DAN TAUFIK	2315-85
Iterasi Optimum pada Minimisasi Energi Biomolekul T1 Lipase dalam Pelarut Metanol SETYANTO TRI WAHYUDI, TONY IBNU SUMARYADA, DAN SIDIKRUBADI PRAMUDITO ..	2316-89
Effects of Different Laser Wavelength on Fluorescence Intensity of Loosed Palm Oil Fruits MINARNI SHIDDIQ DAN ANNESA AULIYA	2317-94
Pembuatan Kalsium Karbonat (CaCO ₃) Berbasis Cangkang Bekicot (<i>Achatina Fulica</i>) dengan Teknik Kalsinasi Sebagai Bahan Baku Biokeramik DWI ASMI, DESTY WULAN NENIATI, ANISA NURDIANA, DAN HELRITA MAULINA	2318-97
Pengaruh Kedalaman pada <i>Output Factor</i> Lapangan Kecil dengan Detektor <i>Thermoluminescence Dosimeter Rods</i> dan <i>Ionization Chamber Exradin A16</i> LARAS ATI NUR FATIMAH, ANDRIAN DEDE HANDIKA, WAHYU EDY WIBOWO, DAN SUPRIYANTO ARDJO PAWIRO	2319-101
Deteksi Magnesium dalam Tanah Terdampak Tsunami dengan Teknik <i>Laser-Induced Break-down Spectroscopy (LIBS)</i> Menggunakan Laser Nd-YAG NASRULLAH IDRIS, KURNIA LAHNA, DAN MULIADI RAMLI	2320-106

Pengaplikasian Metode Fungsi Airy pada Permasalahan Probabilitas Terobosan Kuantum

FANDI OKTASENDRA

Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Jambi, Indonesia.

ABSTRACT: In this work, an Airy function method was applied to solve the problems of quantum tunneling. The transmission probability which corresponds to the probability of quantum particles tunneling through a potential barrier was calculated in the cases of direct tunneling through a trapezoidal band and Fowler-Nordheim (FN) tunneling. The validity of the calculation was verified by comparing the results with those from the calculations using analytically Wentzel-Kramers-Brillouin (WKB) approximation. The calculation results showed a big discrepancy in term of tunneling probability between Airy function method and WKB approximation for lower incident energy and this discrepancy reduces as the incident energy increases. For the case of FN tunneling, the Airy function calculation results in the tunneling probability value that remains less than unity at energies approaching the top of barrier potential, which is suitable for the explanation of wave theory of electron, rather than that of the calculation using WKB approximation which gives the tunneling probability value to unity.

KEYWORDS: Airy function, quantum tunneling, WKB approximation, transmission probability, Fowler-Nordheim tunneling

E-MAIL: email: fandifoks@gmail.com

1 PENDAHULUAN

Fenomena terobosan kuantum melalui penghalang potensial merupakan salah satu fenomena yang sangat penting dalam divais elektronik khususnya yang berbasis semikonduktor. Konsep terobosan kuantum menjadi bagian kunci untuk mengevaluasi unjuk kerja pada divais heterostruktur seperti *resonant tunneling diode*, *travelling-wave tunnel monolithic integrated circuits*, dan *infrared resonant tunneling laser*¹⁾. Meskipun pembahasan terobosan sudah dimulai sejak 60 tahun yang lalu, namun saat ini masih menjadi topic yang menarik untuk mempelajari transport kuantum dalam divais heterostruktur²⁾.

Perhitungan arus terobosan pada divais heterostruktur tipe metal-insulator-semikonduktor (MIS) berbasis pada perhitungan probabilitas terobosan menggunakan metode aproksimasi *Wentzel-Kramers-Brillouin* (WKB) telah dilakukan oleh beberapa studi³⁻⁵⁾. Namun, aproksimasi WKB tidak begitu akurat untuk kasus-kasus tertentu⁶⁾. Pendekatan metode fungsi yang merupakan metode semi analitik untuk memecahkan permasalahan arus terobosan telah ditunjukkan memiliki keakuratan yang bagus untuk menggambarkan proses terobosan pada divais berstruktur MIS^{6, 7)}. Lebih lanjut lagi, metode fungsi Airy yang termodifikasi (*modified Airy function*) telah ditunjukkan dapat diaplikasikan pada proses terobosan untuk berbagai jenis profil penghalang potensial⁸⁾.

Pada penelitian ini, metode fungsi Airy diaplikasikan untuk menyelesaikan kasus terobosan kuantum pada penghalang potensial yang berubah terhadap posisi. Sebagai kasus permasalahan, diambil penghalang potensial berbentuk trapezoid untuk terobosan langsung dan penghalang potensial segitiga untuk terobosan Fowler-Nordheim. Pada divais MIS, terobosan Fowler-Nordheim merupakan proses yang dominan untuk oksida yang tebal⁹⁾.

2 KAJIAN LITERATUR

Fungsi Airy

Fungsi Airy merupakan sebuah solusi dari persamaan differensial biasa (PDB) yang memiliki bentuk¹⁰⁾

$$\frac{d^2 y}{d\xi^2} - \xi y(\xi) = 0, \quad (1)$$

Solusi PDB tersebut berupa dua buah fungsi Airy yang secara linier tidak bergantung satu sama lain yakni $Ai(\xi)$ dan $Bi(\xi)$. Solusi dari Pers. (1) diperoleh

$$y = c_1 Ai(\xi) + c_2 Bi(\xi), \quad (2)$$

dimana c_1 dan c_2 adalah konstanta fungsi Airy.

Solusi fungsi Airy ini dapat diterapkan pada pemecahan persamaan Schrodinger untuk kasus 1 dimensi yang memiliki bentuk

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} - \frac{2m}{\hbar^2}(V(x) - E)\psi = 0 \tag{3}$$

dimana m , \hbar , $V(x)$, ψ , dan E adalah massa partikel, konstanta Planck tereduksi, fungsi potensial, fungsi gelombang partikel dan energi yang dimiliki oleh partikel. Dengan mengambil fungsi potensial linier berupa

$$V(x) = V_0 - \frac{qV_b}{d}x, \tag{4}$$

sehingga Pers. (3) dapat ditulis

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} - \frac{2m}{\hbar^2}\left(V_0 - E - \frac{qV_b}{d}x\right)\psi = 0 \tag{5}$$

atau

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} - \left(\frac{2m}{\hbar^2} \frac{qV_b}{d}\right) \left(\frac{V_0 - E}{qV_b}d - x\right)\psi = 0 \tag{6}$$

Dengan mendefinisikan sebuah fungsi $\xi(x)$,

$$\xi(x) = \left(\frac{2m}{\hbar^2} \frac{qV_b}{d}\right)^{1/3} \left\{ \frac{(V_0 - E)}{qV_b}d - x \right\}, \tag{7}$$

maka Pers (6) dapat ditulis menjadi

$$\frac{d^2\psi}{d\xi^2} - \xi(x)\psi = 0, \tag{8}$$

yang memiliki solusi fungsi Airy seperti pada Pers. (2).

Fenomena terobosan kuantum oleh electron melalui sebuah penghalang potensial dapat digambarkan dengan persamaan Schrodinger. Peluang electron untuk menerobos penghalang potensial merupakan kuadrat dari fungsi gelombang Schrodinger.

Aproksimasi WKB

Aproksimasi WKB dapat digunakan untuk mencari solusi persamaan Schrodinger dengan syarat fungsi potensial tidak berubah terlalu cepat terhadap posisi dan berada jauh dari titik balik klasik atau jarak antara titik balik harus besar ^{11,12}. Pers. (3) dapat dicari solusinya dengan mengambil solusi tebakan fungsi gelombang sebagai berikut:

$$\psi(x) = \exp[\alpha(x)]. \tag{9}$$

Substitusikan ke dalam Pers. (3) diperoleh

$$\frac{\hbar^2}{2m} \left[\frac{d^2\alpha}{dx^2} + \left(\frac{d\alpha}{dx} \right)^2 \right] = V(x) - E. \tag{10}$$

Untuk α yang berubah pelan terhadap x , dapat diasumsikan

$$\frac{d^2\alpha}{dx^2} \ll \left(\frac{d\alpha}{dx} \right)^2, \tag{11}$$

Sehingga

$$\frac{d\alpha}{dx} \approx \left\{ \frac{2m}{\hbar^2} [V(x) - E] \right\}^{1/2}. \tag{12}$$

Dengan demikian, solusi umum fungsi gelombang menjadi

$$\psi(E) = \exp \left(- \int_{x_1}^{x_2} \left\{ \frac{2m}{\hbar^2} [V(x) - E] \right\}^{1/2} dx \right). \tag{13}$$

Probabilitas terobosan dapat dihitung dengan

$$T(E) = \psi(E)\psi^*(E) = \exp \left(-2 \int_{x_1}^{x_2} \left\{ \frac{2m}{\hbar^2} [V(x) - E] \right\}^{1/2} dx \right). \tag{14}$$

3 METODE PENELITIAN

Pada penelitian ini akan dihitung probabilitas terobosan electron melalui penghalang potensial berbentuk trapezoid dan segitiga.

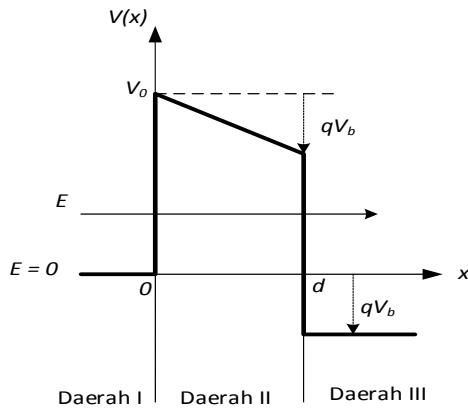
Penghalang potensial berbentuk trapezoid (terobosan langsung)

Perhatikan penghalang potensial berbentuk trapezoid dengan tinggi potensial V_0 yang berubah terhadap x karena diberikan tegangan bias V_b dan ketebalan potensial d seperti pada Gambar 1. Titik $x = 0$ diambil pada antar muka antara daerah I dan daerah II. Terobosan langsung terjadi apabila energy partikel lebih kecil dari $V_0 - V_b$.

Fungsi potensial untuk masing-masing daerah diberikan oleh

$$V(x) = \begin{cases} 0 & \text{untuk } x < 0, \\ V_0 - \frac{qV_b}{d}x & \text{untuk } 0 < x < d \\ -qV_b & \text{untuk } x > d \end{cases} \tag{15}$$

Dengan memasukkan fungsi potensial tersebut ke dalam persamaan Schrödinger seperti pada Pers. (3) untuk setiap daerah, maka akan diperoleh solusi umum fungsi gelombang,



Gambar 1. Penghalang potensial trapezoidal untuk terobosan langsung

$$\begin{aligned} \psi_I &= \exp(ik_1x) + r \exp(-ik_1x) \quad , x < 0, \\ \psi_{II} &= AAi(\xi(x)) + BBi(\xi(x)) \quad , 0 < x < d \\ \psi_{III} &= t \exp(ik_3x) \quad , x > d \end{aligned}$$

dengan

$$\begin{aligned} k_1 &= \sqrt{\frac{2m_1}{\hbar^2} E_r (V_0 - V_b)}, \\ k_3 &= \sqrt{\frac{2m_3}{\hbar^2} (E_r (V_0 - V_b) + qV_b)} \\ \xi(x) &= \left(\frac{2m}{\hbar^2} \frac{eV_b}{d}\right)^{1/3} \left\{ \frac{V_0(1 - E_r(1 - V_b/V_0))}{eV_b} d - x \right\}, \\ E_r &= \frac{E}{V_0 - V_b} \end{aligned}$$

dimana A, B, t, dan r adalah koefisien fungsi gelombang, sedangkan k_1 dan k_3 adalah bilangan gelombang pada daerah I dan III. Fungsi $\xi(x)$ pada solusi fungsi Airy pada daerah II memiliki bentuk yang sama dengan Pers. (7). Untuk menghitung koefisien pada fungsi gelombang tersebut, maka diterapkan syarat batas dan kontinuitas BenDaniel-Duke pada kedua antar muka yakni $x = 0$ dan $x = d$, sebagai berikut

$$\psi_I(x=0) = \psi_{II}(x=0),$$

$$\frac{1}{m_1} \left[\frac{d\psi_I}{dx} \right]_{x=0} = \frac{1}{m_2} \left[\frac{d\psi_{II}}{dx} \right]_{x=0},$$

dan

$$\psi_{II}(x=d) = \psi_{III}(x=d),$$

$$\frac{1}{m_2} \left[\frac{d\psi_{II}}{dx} \right]_{x=d} = \frac{1}{m_3} \left[\frac{d\psi_{III}}{dx} \right]_{x=d}.$$

Penerapan syarat batas ini menghasilkan koefisien transmisi, t, yang diberikan oleh

$$\begin{aligned} t &= -2i \frac{k_1 f_1}{m_2} \exp(-ik_1 d) \\ &\times \left\{ \left(\frac{2}{\hbar^2 m_2} \frac{eV_b}{d} \right)^{1/3} f_1 + i \left(\frac{k_1 f_3 + k_3 f_4}{m_1 + m_3} - \frac{k_1 k_3}{m_2 m_2} \left(\frac{2}{\hbar^2 m_2} \frac{eV_b}{d} \right)^{-1/3} \right) f_5 \right\}^{-1}, \end{aligned}$$

dengan

$$\begin{aligned} f_1 &= Ai'(\xi(d))Bi(\xi(d)) - Ai(\xi(d))Bi'(\xi(d)), \\ f_2 &= Ai'(\xi(d))Bi'(\xi(0)) - Ai'(\xi(0))Bi'(\xi(d)), \\ f_3 &= Ai(\xi(0))Bi'(\xi(d)) - Ai'(\xi(d))Bi(\xi(0)), \\ f_4 &= Ai(\xi(d))Bi'(\xi(0)) - Ai'(\xi(0))Bi(\xi(d)), \\ f_5 &= Ai(\xi(0))Bi(\xi(d)) - Ai(\xi(d))Bi(\xi(0)). \end{aligned}$$

Tanda aksent (') pada fungsi Airy merupakan turunan fungsi Airy terhadap $\xi(x)$. Probabilitas terobosan, T dapat diperoleh dari koefisien transmisi

$$T = \frac{k_3}{k_1} \frac{m_1}{m_3} |t|^2.$$

Untuk aproksimasi WKB, probabilitas terobosan dapat dihitung dengan menggunakan Pers. (18) dengan integrasi dari $x_1 = 0$ sampai $x_2 = d$ sehingga diperoleh

$$T(E) = \exp\left(-\frac{4}{3} \sqrt{\frac{2m}{\hbar^2}} \frac{d}{qV_b} \left[(V_0 - E)^{3/2} - (V_0 - V_b - E)^{3/2} \right] \right)$$

Penghalang potensial segitiga (terobosan Fowler-Nordheim)

Jika energy partikel lebih besar dari $V_0 - V_b$, maka partikel akan menerobos melewati penghalang potensial berbentuk segitiga seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2. Terobosan seperti ini dikenal dengan terobosan Fowler-Nordheim (FN) ⁹⁾. Potensial segitiga juga bisa diperoleh jika pemberian medan yang cukup besar. Pada terobosan FN, partikel hanya melewati sebagian saja dari penghalang potensial sehingga titik balik klasik berada diantara ketebalan potensial, seperti terlihat pada Gambar 2.

Fungsi potensial untuk masing-masing daerah diberikan oleh

$$V(x) = \begin{cases} 0 & \text{untuk } x < 0, \\ V_0 - \frac{qV_b}{d}x & \text{untuk } 0 < x < a \\ V_0 - \frac{qV_b}{d}x & \text{untuk } a < x < d \\ -qV_b & \text{untuk } x > d \end{cases}$$

dengan

$$a = \frac{V_0 - E}{qV_b}d$$

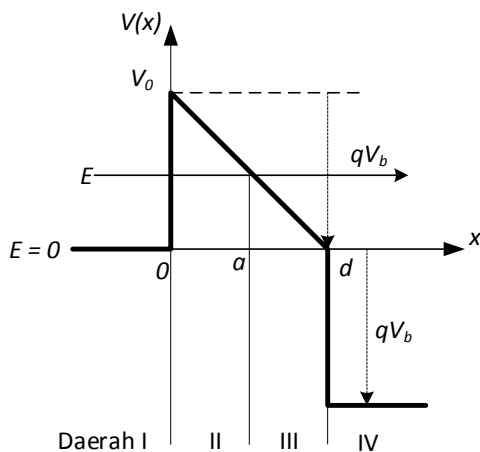
Solusi umum persamaan Schrodinger untuk fungsi potensial tersebut adalah

$$\begin{aligned} \psi_I &= \exp(ik_1x) + r \exp(-ik_1x) \quad , x < 0, \\ \psi_{II} &= AAi(\xi(x)) + BBi(\xi(x)) \quad , 0 < x < a \\ \psi_{III} &= CAi(\gamma(x)) + DBi(\gamma(x)) \quad , a < x < d \\ \psi_{IV} &= t \exp(ik_3x) \quad , x > d \end{aligned}$$

dengan

$$\begin{aligned} k_1 &= \sqrt{\frac{2m_1}{\hbar^2} E_n V_0}, \\ k_3 &= \sqrt{\frac{2m_3}{\hbar^2} (E_n V_0 + qV_b)} \end{aligned}$$

$$\xi(x) = \gamma(x) = \left(\frac{2m}{\hbar^2} \frac{eV_b}{d}\right)^{1/3} \left\{ \frac{V_0(1-E_n)}{eV_b}d - x \right\} E_n = \frac{E}{V_0}$$



Gambar 2. Penghalang potensial segitiga untuk terobosan Fowler-Nordheim

Penerapan syarat batas dan kontinuitas BenDaniel-Duke pada $x = 0$, $x = a$, dan $x = d$, memberikan nilai konstanta pada masing-masing fungsi koe-

fisien fungsi gelombang sehingga diperoleh koefisien transmisi, t ,

$$t = -2ik_1 \exp(-ik_3d) \times \left\{ (f_2f_3 + f_1f_4)(ik_1l_1 - pl_1) + (f_2f_5 + f_1f_6)(ik_1l_2 - pl_2) \right\}^{-1},$$

Dengan

$$\begin{aligned} f_1 &= \frac{pAi'(\gamma(d)) + ik_3Ai(\gamma(d))}{pBi(\gamma(d))Ai'(\gamma(d)) - pBi'(\gamma(d))Ai(\gamma(d))}, \\ f_2 &= \frac{pBi'(\gamma(d)) + ik_3Bi(\gamma(d))}{pAi(\gamma(d))Bi'(\gamma(d)) - pAi'(\gamma(d))Bi(\gamma(d))}, \\ f_3 &= \frac{Ai(\gamma(a))Bi'(\xi(a)) - Ai'(\gamma(a))Bi(\xi(a))}{Ai(\xi(a))Bi'(\xi(a)) - Ai'(\xi(a))Bi(\xi(a))}, \\ f_4 &= \frac{Bi(\gamma(a))Bi'(\xi(a)) - Bi'(\gamma(a))Bi(\xi(a))}{Ai(\xi(a))Bi'(\xi(a)) - Ai'(\xi(a))Bi(\xi(a))}, \\ f_5 &= \frac{Ai(\gamma(a))Ai'(\xi(a)) - Ai'(\gamma(a))Ai(\xi(a))}{Bi(\xi(a))Ai'(\xi(a)) - Bi'(\xi(a))Ai(\xi(a))}, \\ f_6 &= \frac{Bi(\gamma(a))Ai'(\xi(a)) - Bi'(\gamma(a))Ai(\xi(a))}{Bi(\xi(a))Ai'(\xi(a)) - Bi'(\xi(a))Ai(\xi(a))}. \end{aligned}$$

$$p = \left(\frac{2m}{\hbar^2} \frac{eV_b}{d}\right)^{1/3},$$

$$\begin{aligned} l_1 &= Ai(\xi(0)), \\ l_1' &= Ai'(\xi(0)), \\ l_2 &= Bi(\xi(0)), \\ l_2' &= Bi'(\xi(0)), \end{aligned}$$

Probabilitas terobosan, $T(E/V_0)$ diberikan oleh

$$T = \frac{k_3}{k_1} \frac{m_1}{m_3} |t|^2.$$

Sementara itu, aproksimasi WKB memberikan probabilitas terobosan

$$T(E) = \exp\left(-\frac{4}{3} \sqrt{\frac{2m}{\hbar^2}} \frac{d}{qV_b} (V_0 - E)^{3/2}\right)$$

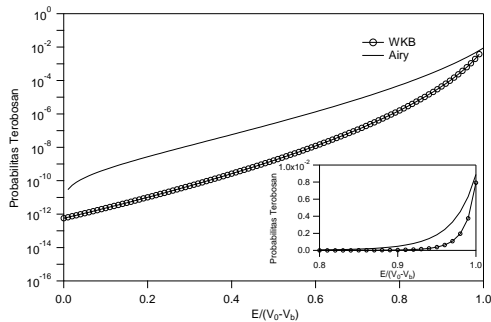
Pada simulasi akan digunakan parameter-parameter standar sebagai berikut. Muatan electron (q), konstanta tereduksi Planck (\hbar), dan massa diam electron (m_0) dinyatakan dalam satuan SI. Massa efektif electron pada setiap daerah (m_1 , m_2 , dan m_3) mempunyai nilai sama dengan massa diam m_0 . Asumsi ini digunakan untuk memudahkan perhitungan walaupun sebenarnya nilai tersebut berbeda-beda tergantung pada material yang digunakan.

4 HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bagian ini akan ditampilkan hasil simulasi terhadap perhitungan probabilitas terobosan untuk kasus-kasus yang diambil pada bagian sebelumnya.

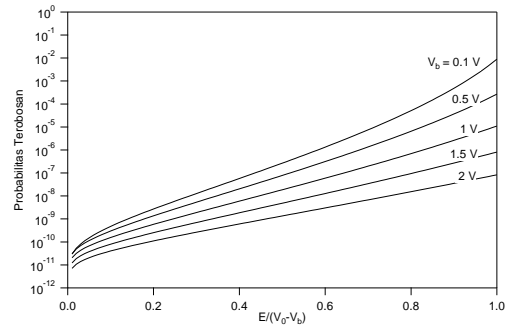
Probabilitas terobosan pada penghalang potensial trapezoidal

Gambar 3 menunjukkan probabilitas terobosan sebagai fungsi dari energy tereduksi, $E/(V_0 - V_b)$ untuk kasus penghalang potensial trapezoid yang dihitung dengan menggunakan metode fungsi Airy dan aproksimasi WKB. Nilai energy diambil sampai $V_0 - V_b$ untuk mendapatkan terobosan langsung. Dari gambar tersebut terlihat bahwa probabilitas terobosan meningkat seiring dengan meningkatnya energy datang electron. Dengan tinggi potensial yang diambil cukup tinggi ($V_0 = 5 V$), terlihat besaran nilai probabilitas terobosan yang sangat kecil. Dari kedua metode yang digunakan, terlihat perbedaan nilai probabilitas terobosan yang cukup besar pada energy rendah. Namun, perbedaan tersebut berkurang seiring dengan meningkatnya energy. Perhitungan dengan aproksimasi WKB memberikan nilai yang lebih rendah dibandingkan dengan fungsi Airy. Namun, pada saat E mendekati $V_0 - V_b$ nilai probabilitas terobosan kedua metode hampir sama.

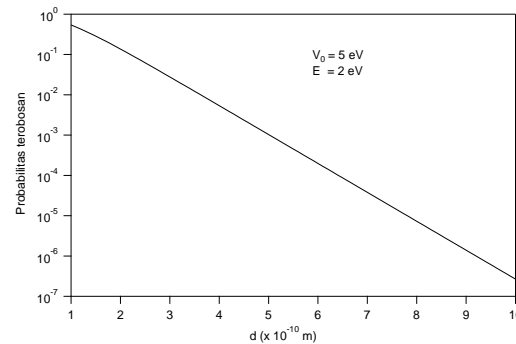


Gambar 3. Plot logaritmik dari probabilitas terobosan sebagai fungsi $E/V_0 - V_b$ untuk potensial trapezoid $V_0 = 5 V$, $d = 1 nm$ dan $V_b = 0.1 V$. Probabilitas terobosan untuk energy yang mendekati $V_0 - V_b$ ditunjukkan pada inset.

Beberapa parameter yang mempengaruhi nilai probabilitas terobosan juga ditunjukkan pada hasil simulasi. Gambar 4 menunjukkan pengaruh tegangan bias V_b terhadap nilai probabilitas terobosan. Terlihat bahwa dengan menaikkan tegangan bias, maka probabilitas terobosan akan menurun. Hal ini disebabkan karena, dengan menaikkan tegangan bias, maka akan memperbesar degradasi potensial sehingga menambah curam sisi miring pada potensial. Akibatnya, nilai energy datang electron yang dimungkinkan agar bisa melakukan terobosan langsung juga berkurang.



Gambar 4. Plot logaritmik dari probabilitas terobosan sebagai fungsi $E/V_0 - V_b$ untuk potensial trapezoid dengan variasi V_b



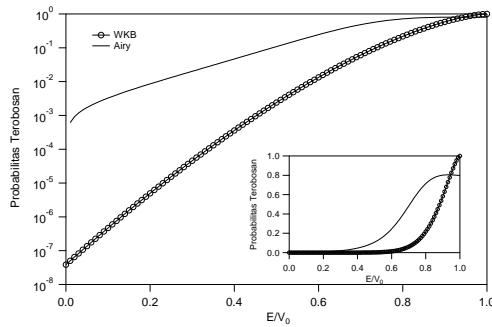
Gambar 5 Probabilitas terobosan sebagai fungsi ketebalan d untuk potensial trapezoid.

Pengaruh ketebalan penghalang potensial terhadap probabilitas terobosan juga diperhitungkan dalam penelitian ini. Hasil simulasi menunjukkan probabilitas terobosan menurun seiring dengan meningkatnya ketebalan potensial penghalan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5. Linieritas kurva pada Gambar 5 menunjukkan bahwa ketebalan penghalang potensial berbanding terbalik dengan logaritmik probabilitas terobosan.

Probabilitas terobosan pada penghalang potensial segitiga (terobosan Fowler-Nordheim)

Pada perhitungan probabilitas terobosan untuk kasus penghalang segitiga seperti pada Gambar 2, diambil $V_0 = 1 V$ dan $d = 1 nm$. Besar tegangan bias V_b sama dengan V_0 . Gambar 6 menunjukkan probabilitas terobosan sebagai fungsi energy tereduksi E/V_0 yang dihitung dengan metode fungsi Airy dan aproksimasi WKB. Dari gambar tersebut terlihat adanya perbedaan probabilitas terobosan yang sangat besar pada energy rendah dan perbedaan tersebut berkurang seiring dengan meningkatnya energy. Namun kedua kurva menunjukkan karakteristik probabilitas yang sama yakni probabilitas meningkat seiring dengan meningkatnya energi. Akan

tetapi, terdapat perbedaan kecendrungan kurva pada saat energy mendekati puncak potensial, V_0 seperti yang ditunjukkan pada inset Gambar 6.



Gambar 6. Plot logaritmik dari probabilitas terobosan sebagai fungsi E/V_0 untuk potensial segitiga dengan $V_0 = 1$ V dan $d = 1$ nm. Plot linier probabilitas terobosan ditunjukkan pada inset.

Pada kurva aproksimasi WKB, probabilitas terobosan tetap meningkat menuju 1 saat E/V_0 menuju 1. Hal ini dikarenakan pada rumusan aproksimasi WKB, probabilitas terobosan hanya diekspresikan dalam fungsi eksponensial. Sehingga pada saat $E = V_0$, probabilitas terobosan sama dengan 1, artinya tidak ada reflektansi. Sementara itu, pada perhitungan fungsi Airy, terdapat puncak maksimum local pada saat E mendekati V_0 yang nilainya kurang dari 1 dan kemudian probabilitas menurun seiring energy meningkat menuju $E/V_0 = 1$. Hal ini lebih sesuai dengan teori gelombang dengan memandang electron sebagai gelombang partikel. Karena fungsi potensial berubah terhadap posisi, maka bilangan gelombang juga mengalami perubahan bergantung pada fungsi posisi. Berubahnya nilai gelombang tersebut mengindikasikan bahwa terdapat gelombang yang ditransmisikan dan direfleksikan pada daerah II sehingga nilai probabilitas transmisi lebih kecil dari 1⁶⁾. Tidak mengherankan mengapa aproksimasi WKB tidak menunjukkan hal ini pada saat E mendekati V_0 karena aproksimasi WKB tidak berlaku lagi saat mendekati titik balik klasik atau d sangat kecil.

5 KESIMPULAN

Perhitungan probabilitas terobosan dengan menggunakan fungsi Airy sebagai sebuah solusi dari persamaan Schrodinger telah dilakukan pada penelitian ini. Metode penyelesaian fungsi Airy telah diterapkan pada kasus terobosan langsung oleh electron melalui penghalang potensial berbentuk trapezoid dan terobosan Fowler-Nordheim melalui penghalang potensial berbentuk segitiga. Probabili-

tas terobosan meningkat seiring dengan meningkatnya energy datang electron yang melakukan terobosan. Dengan meningkatkan tegangan bias mengakibatkan degradasi penghalang potensial semakin besar sehingga energy datang elektron untuk melakukan terobosan langsung semakin berkurang yang berakibat pada penurunan probabilitas terobosan. Probabilitas terobosan menurun jika ketebalan penghalang potensial dinaikkan.

Perhitungan probabilitas terobosan menggunakan fungsi Airy telah dibandingkan dengan metode aproksimasi WKB. Terdapat perbedaan probabilitas yang cukup besar untuk energy datang rendah dan semakin berkurang dengan meningkatnya energy datang. Untuk kasus terobosan Fowler-Nordheim, metode fungsi Airy lebih menunjukkan kesesuaian dengan teori gelombang dibandingkan dengan metode aproksimasi WKB khususnya pada saat energy datang electron mendekati puncak penghalang potensial.

REFERENSI

- [1] D. Dragoman and M. Dragoman, *IEEE J Quantum Elect.*, 32, 1150, 1996.
- [2] F.A. Noor, M. Abdullah, S. Sukirno, K. Khairurrijal, *Indonesian J. Physics*, 18 (2), 2007
- [3] D. Hocine, M. S. Belkaid, K. Lagha, *Revue des Energies Renouvelables* 11 (2008) 379-384.
- [4] W. W. Wenas, S. Riyadi, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 90 (2006) 3261-3267.
- [5] F. Bouzid, S. Ben Machich, *Revue des Energies Renouvelables* 13 (2010) 283-294.
- [6] A. B. Suryamas, *Electron spin polarization in semiconductor heterostructure with single and double barriers*, Thesis Magister, Institut Teknologi Bandung, Indonesia, 2007.
- [7] F. A. Noor, M. Abdullah, Sukirno, Khairurrijal, *J. Semicond.* 31 (2010) 13402-1/5.
- [8] Ki-Young Lee¹, Chul Han Kim¹, Dongwook Park², and Chang-Min Kim^{1*}, *Journal of the Optical Society of Korea*, 19 (2) 2015 188-198
- [9] S. M. Sze, Kwok K. Ng. *Physics of Semiconductor Device*. New York: John Wiley&Sons. 2007
- [10] Abramowitch M and Stegun I A 1964 *Handbook of Mathematical Functions* (Washington, DC: National Bureau of Standards, United States Department of Commerce)
- [11] S. Gasiorowicz. *Quantum Physics*. NewYork : John Wiley & Sons. 1974
- [12] R. L. Liboff. *Introductory Quantum Mechanics*. USA : Addison Wesley. 1998

Singularitas Ruang-Waktu Bermetrik Kerr dan Kerr-Newman dalam Teori Relativitas Umum

LENI RUMIYANTI¹⁾ DAN MUHAMMAD FARCHANI ROSYID²⁾

¹⁾Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung, Lampung, Indonesia. ²⁾Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia.

ABSTRACT: Spacetime singularity in general theory of relativity has been considered. The definition of singularity was used based on the Kretschmann scalar criteria. The character of spacetime geometry in the region around singularity for the two spacetime metric has been identified according to calculation. The two spacetime metric are Kerr and Kerr-Newman metric. The similarity between Kerr and Kerr-Newman metric were singularity region, shape of singularity, and its Penrose diagram. While, the different between Kerr and Kerr-Newman metric was at the pseudo-singularity region or event horizon.

KEYWORDS: Event horizon, Kretschmann scalar, singularity

E-MAIL: ¹⁾lenirumiyanti@unila.ac.id, ²⁾farchani@ugm.ac.id

1 PENDAHULUAN

Salah satu model matematis yang cukup mashur di bidang fisika adalah mekanika klasik dan teori gravitasi. Mekanika klasik diusulkan oleh Newton untuk menjelaskan gerak. Sementara, gravitasi dimaksudkan oleh Newton sebagai gaya tarik-menarik antara dua benda bermassa yang bergantung pada jarak antara keduanya. Newtonpun berpendapat bahwa ruang dan waktu bersifat mutlak. Pemutlakan ini bertahan dalam waktu yang cukup lama sampai akhirnya dimandulkan oleh Einstein pada 1905.

Menurut Einstein, ruang dan waktu bersifat relatif. Einstein berpendapat ruang dan waktu tidak mungkin ada tanpa yang lainnya; keduanya membentuk ruang-waktu yang ditimbulkan oleh segenap peristiwa. Oleh karena itu, Einstein menganggap ruang-waktu bukanlah sesuatu yang dapat memiliki eksistensi mandiri, melainkan eksistensinya ditentukan oleh materi dan energi. Gravitasi pun dianggap Einstein bukan sebagai gaya, melainkan manifestasi dari kelengkungan ruang-waktu.

Akhirnya, pada 1915 Einstein mengajukan Teori Relativitas Umum (TRU). TRU adalah teori yang menjelaskan gravitasi, pengaruh sebaran massa, dan energi yang mengakibatkan perubahan ruang-waktu. Ketika sebaran massa dan energi terpusat pada suatu tempat, hingga mencapai batas maksimal dengan kelengkungan yang sudah tidak dapat dipertahankan lagi dan akhirnya “berlubang”, maka terbentuklah singularitas ruang-waktu.

Keberadaan singularitas ruang-waktu sampai saat ini diprakirakan dapat ditemukan di dua keadaan, yaitu daerah dengan medan gravitasi yang sangat

kuat seperti *black hole* (Penrose, 1964) dan sesaat setelah dentuman besar seperti *big bang* (Hawking, 2005).

Singularitas ruang-waktu sendiri terdiri atas dua jenis, yaitu singularitas semu dan singularitas nyata. Singularitas semu adalah singularitas yang dapat dihindari dengan alih-ragam koordinat. Sementara, singularitas nyata adalah singularitas yang tidak dapat dihindari dengan alih-ragam koordinat (Hawking dan Ellis, 1973). Singularitas semu dapat dicari dengan menggunakan kriteria tensor metrik. Sementara, singularitas nyata dapat dicari dengan menggunakan berbagai macam kriteria, salah satunya adalah skalar Kretschmann. Skalar ini pertama kali diperkenalkan oleh Kretschmann pada 1915 (Geovanelli, 2012). Skalar Kretschmann adalah hasil kontraksi atau lacak trace dari tensor kelengkungan Riemann yang dituliskan (Joshi, 2007):

$$\mathcal{R} = R^{\mu\nu\sigma\rho} R_{\mu\nu\sigma\rho} . \quad (1)$$

Dipilihnya skalar Kretschmann dikarenakan skalar ini tidak bergantung pada sistem koordinat. Artinya, sekali singularitas pada suatu sistem koordinat, maka akan tetap singularitas pada sistem koordinat lain. Skalar ini menunjukkan adanya singularitas jika bernilai tak berhingga. Jika baik tensor metrik maupun skalar Kretschmann pada suatu ruang-waktu bernilai tak berhingga, maka singularitas yang terjadi adalah singularitas nyata. Akan tetapi, jika tensor metriknya bernilai tak berhingga sementara skalar Kretschmannnya tidak, maka singularitas yang terjadi hanyalah singularitas semu saja.

Oleh karena itu, penelitian ini menggunakan TRU untuk mengetahui watak geometri ruang-

waktu di daerah sekitar singularitas untuk dua jenis metrik, yaitu Kerr dan Kerr-Newman. *Metrik Kerr* adalah solusi bagi persamaan medan Einstein untuk partikel tidak bermuatan tetapi berputar (Kerr, 1963). Sementara, *metrik Kerr-Newman* adalah solusi bagi persamaan medan Einstein untuk partikel bermuatan sekaligus berputar (Newman dkk, 1964).

2 METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan kajian teoritis. Oleh sebab itu, akan banyak dilakukan perhitungan matematis yang bersifat tedesius sehingga digunakanlah alat bantu program simbolik, yaitu Maple 13.

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

Watak Geometri Ruang-Waktu pada Metrik Kerr

Berdasarkan perhitungan diperoleh tensor metrik pada metrik Kerr, yaitu

$$\begin{aligned}
 g_{00} &= -\left(1 - \frac{2mr}{r^2 + a^2 \cos^2 \theta}\right) \\
 g_{11} &= \frac{r^2 + a^2 \cos^2 \theta}{r^2 - 2mr + a^2} \\
 g_{22} &= r^2 + a^2 \cos^2 \theta \\
 g_{33} &= \sin^2 \theta \left(r^2 + a^2 + \frac{2mra^2 \sin^2 \theta}{r^2 + a^2 \cos^2 \theta}\right) \\
 g_{03} &= g_{30} = -\left(\frac{2mrasin^2 \theta}{r^2 + a^2 \cos^2 \theta}\right) \tag{2}
 \end{aligned}$$

Jika melihat tensor metrik tersebut di atas, maka singularitas diprediksi akan terjadi ketika $r^2 + a^2 \cos^2 \theta = 0$ dan $r^2 - 2mr + a^2 = 0$. Hal ini dikarenakan di $r^2 + a^2 \cos^2 \theta = 0$, tensor metrik g_{00} , g_{03} , g_{30} , dan g_{33} bernilai tak berhingga. Sementara, di $r^2 - 2mr + a^2 = 0$, tensor metrik g_{11} yang bernilai tak berhingga. Dari syarat $r^2 + a^2 \cos^2 \theta = 0$, diketahui bahwa $r = 0$ dan $\theta = \frac{\pi}{2}$. Sementara, dari syarat $r^2 - 2mr + a^2 = 0$, diketahui bahwa $r_{1,2} = m \pm \sqrt{m^2 - a^2}$.

Prediksi terjadinya singularitas ruang-waktu tersebut harus diuji dengan menggunakan nilai skalar Kretchmann pada metrik itu. Berdasarkan perhitungan skalar Kretchmann pada metrik Kerr, diperoleh

$$\mathcal{R} = 48m^2(r^2 - a^2 \cos^2 \theta)[(r^2 + a^2 \cos^2 \theta)^2 - 16r^2 a^2 \cos^2 \theta] / (r^2 + a^2 \cos^2 \theta)^6. \tag{3}$$

Ketika skalar Kretchmann dievaluasi di $r = 0$ dan $\theta = \frac{\pi}{2}$, diperoleh

$$\mathcal{R} = \infty. \tag{4}$$

Sementara, ketika skalar Kretchmann dievaluasi di $r_{1,2} = m \pm \sqrt{m^2 - a^2}$, diperoleh

$$\mathcal{R} \neq \infty. \tag{5}$$

Berdasarkan hasil perhitungan tersebut, dapat dikatakan bahwa singularitas ruang-waktu pada metrik Kerr terjadi di daerah $r = 0$ dan $\theta = \frac{\pi}{2}$. Singularitas ini adalah singularitas nyata karena baik tensor metrik maupun skalar Kretchmann bernilai tak berhingga. Sementara, daerah $r_{1,2} = m \pm \sqrt{m^2 - a^2}$ itu hanyalah singularitas semu karena tensor metrik bernilai tak berhingga tetapi skalar Kretchmannnya berhingga. Keberadaan singularitas semu ini menentukan horison peristiwanya. *Horizon peristiwa* adalah batas fisik dari titik pusat lubang hitam dimana materi dan energi tidak dapat melepaskan diri dari jerat gravitasi lubang hitam. Jadi, dapat dikatakan bahwa horison peristiwa pada metrik Kerr adalah daerah $r_{1,2} = m \pm \sqrt{m^2 - a^2}$. Hal ini sesuai dengan rujukan seperti Wiltshire, Visser, dan Scott (2009) serta Visser (2008).

Watak Geometri Ruang-Waktu Pada Metrik Kerr-Newman

Berdasarkan perhitungan diperoleh tensor metrik pada metrik Kerr-Newman, yaitu

$$\begin{aligned}
 g_{00} &= -\left(1 - \frac{(2mr - Q^2)}{r^2 + a^2 \cos^2 \theta}\right) \\
 g_{11} &= \frac{r^2 + a^2 \cos^2 \theta}{r^2 - 2mr + a^2 + Q^2} \\
 g_{22} &= r^2 + a^2 \cos^2 \theta \\
 g_{33} &= \sin^2 \theta \left(r^2 + a^2 + \frac{(2mr - Q^2)a^2 \sin^2 \theta}{r^2 + a^2 \cos^2 \theta}\right) \\
 g_{03} &= g_{30} = -\left(\frac{(2mr - Q^2)asin^2 \theta}{r^2 + a^2 \cos^2 \theta}\right) \tag{6}
 \end{aligned}$$

Jika melihat tensor metrik tersebut di atas, maka singularitas diprediksi akan terjadi ketika $r^2 + a^2 \cos^2 \theta = 0$ dan $r^2 - 2mr + a^2 + Q^2 = 0$. Hal ini dikarenakan di $r^2 + a^2 \cos^2 \theta = 0$, tensor metrik g_{00} , g_{03} , g_{30} , dan g_{33} bernilai tak berhingga. Sementara, di $r^2 - 2mr + a^2 + Q^2 = 0$, tensor metrik g_{11} yang bernilai tak berhingga. Dari syarat $r^2 + a^2 \cos^2 \theta = 0$, diketahui bahwa $r = 0$ dan $\theta = \frac{\pi}{2}$. Sementara, dari syarat $r^2 - 2mr + a^2 + Q^2 = 0$, diketahui bahwa $r_{1,2} = m \pm \sqrt{m^2 - a^2 - Q^2}$.

Prediksi terjadinya singularitas ruang-waktu tersebut harus diuji dengan menggunakan nilai skalar Kretchmann pada metrik itu. Berdasarkan perhitungan skalar Kretchmann pada metrik Kerr-Newman, diperoleh

$$\mathcal{R} = \frac{8}{(r^2 + a^2 \cos^2 \theta)^6} [6m^2(r^6 - 15a^2r^4 \cos^2 \theta + 15a^4r^2 \cos^4 \theta - a^6 \cos^6 \theta) - 12mQ^2r(r^4 - 10a^2r^2 \cos^2 \theta + 5a^4 \cos^4 \theta) + Q^4(7r^4 - 34a^2r^2 \cos^2 \theta + 7a^4 \cos^4 \theta)]. \tag{7}$$

Ketika skalar Kretschmann dievaluasi di $r = 0$ dan $\theta = \frac{\pi}{2}$, diperoleh

$$\mathcal{R} = \infty. \tag{8}$$

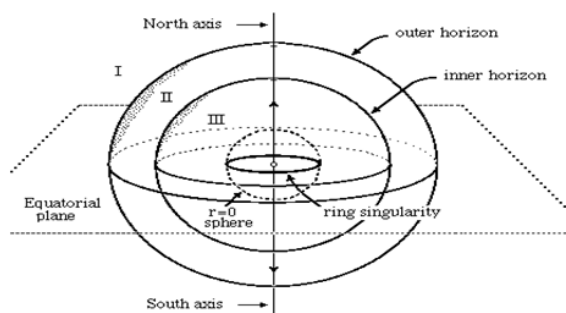
Sementara, ketika skalar Kretschmann dievaluasi di $r_{1,2} = m \pm \sqrt{m^2 - a^2 - Q^2}$, diperoleh

$$\mathcal{R} \neq \infty. \tag{9}$$

Berdasarkan hasil perhitungan tersebut, dapat dikatakan bahwa singularitas ruang-waktu pada metrik Kerr-Newman terjadi di daerah $r = 0$ dan $\theta = \frac{\pi}{2}$. Singularitas ini adalah singularitas nyata karena baik tensor metrik maupun skalar Kretschmann bernilai tak berhingga. Sementara, daerah $r_{1,2} = m \pm \sqrt{m^2 - a^2 - Q^2}$ itu hanyalah singularitas semu karena tensor metrik bernilai tak berhingga tetapi skalar Kretschmannnya berhingga. Artinya, horizon peristiwa pada metrik Kerr-Newman adalah daerah $r_{1,2} = m \pm \sqrt{m^2 - a^2 - Q^2}$. Hal ini sesuai dengan rujukan seperti Wiltshire, Visser, dan Scott (2009) serta Henry (2009).

Persamaan dan Perbedaan antara Metrik Kerr dan Kerr-Newman

Berdasarkan perhitungan di atas, diketahui bahwa daerah singularitas pada metrik Kerr dan Kerr-Newman adalah sama, yaitu terjadi di daerah $r = 0$ dan $\theta = \frac{\pi}{2}$ di koordinat Boyer Linqvist. Artinya, bentuk singularitasnya pun sama, yaitu berbentuk cincin seperti



Gambar 1. Cincin Singularitas (O'Neil, 1995)

Perbedaan antara metrik Kerr dan Kerr-Newman hanya terletak pada singularitas semu atau horizon peristiwanya saja. Horizon peristiwa untuk metrik Kerr ada dua, yaitu di

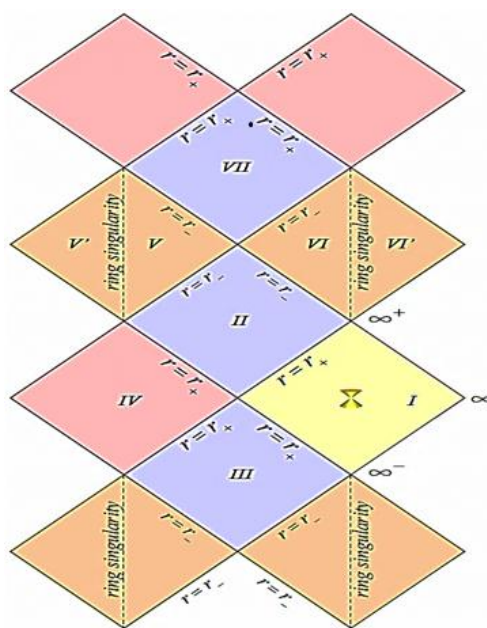
$$\begin{aligned} r_- &= m - \sqrt{m^2 - a^2} \\ r_+ &= m + \sqrt{m^2 - a^2} \end{aligned} \tag{10}$$

Sementara, horizon peristiwa untuk metrik Kerr-Newman juga ada dua, yaitu di

$$\begin{aligned} r_- &= m - \sqrt{m^2 - (a^2 + Q^2)} \\ r_+ &= m + \sqrt{m^2 - (a^2 + Q^2)} \end{aligned} \tag{11}$$

Secara fisis, horizon peristiwa untuk metrik Kerr maupun Kerr-Newman memiliki makna yang sama, yaitu bahwa benda yang telah masuk melewati horizon peristiwa, maka benda tersebut tidak akan bisa keluar lagi. Sementara, perbedaan horizon peristiwa antara metrik Kerr dan Kerr-Newman hanyalah terletak pada radiusnya. Berdasarkan persamaan di atas, terlihat bahwa radius horizon peristiwa untuk metrik Kerr secara umum lebih besar dari radius horizon peristiwa untuk metrik Kerr-Newman.

Selain daerah dan bentuk singularitas, persamaan lain antara metrik Kerr dengan Kerr-Newman adalah diagram konformalnya (diagram Penrose). Diagram ini bertujuan untuk menarik titik-titik di *infinite* menjadi titik-titik yang *finite*. Selain itu, diagram Penrose juga dibuat sedemikian rupa sehingga cahaya selalu digambarkan sebagai garis dengan kemiringan 45 derajat. Dengan demikian, relasi kausal antar titik di ruang-waktu diharapkan menjadi lebih mudah dipahami seperti gambar berikut.



Gambar 2. Diagram Penrose, (Hawking dan Ellis, 1973)

4 SIMPULAN

Berdasarkan hasil dan pembahasan dapat disimpulkan bahwa daerah singularitas pada metrik

Kerr terletak di $r = 0$ dan $\theta = \frac{\pi}{2}$. Daerah $r_{1,2} = m \pm \sqrt{m^2 - a^2}$ hanyalah singularitas semu, bukan singularitas nyata. Sementara, daerah singularitas pada metrik Kerr-Newman terletak di $r = 0$ dan $\theta = \frac{\pi}{2}$. Daerah $r_{1,2} = m \pm \sqrt{m^2 - a^2 - Q^2}$ hanyalah singularitas semu, bukan singularitas nyata.

Persamaan antara metrik Kerr dan Kerr-Newman adalah daerah singularitas, bentuk singularitas, dan diagram Penrose. Sementara, perbedaan antara metrik Kerr dan Kerr-Newman hanya terletak pada singularitas semu atau horizon peristiwa.

REFERENSI

- [1] Giovanelli, M., 2012, Erich Kretschmann as a Proto-Logical-Empiricist: Adventures and Misadventures of the Point-Coincidence Argument, University of Tübingen, Germany.
- [2] Hawking, S.W., dan Ellis, G.F.R., 1973, The Large Structure of Spacetime, Cambridge University Press, Cambridge.
- [3] Hawking, S. W., 2005, The Theory of Everything, Phoenix Books, Beverly Hill.
- [4] Henry, R.C., 1999, Kretschmann Scalar for a Kerr-Newman Black Hole, ArXiv: astro-ph/9912320v1.
- [5] Joshi, P.S., 2007, Gravitational Collapse and Spacetime Singularity, Cambridge University Press, Cambridge.
- [6] Kerr, R.P, 1963, Gravitational Field of a the Spinning Mass an Example of Algebraically Special Metric, Physics Review Letter Volume 11, Number 5.
- [7] Newman, E.T. dan dkk, 1964, Metric of a Rotating, Charged Mass. Journal of Mathematical Physics, Volume 6, Number 6.
- [8] O'Neill, B., 1995, The Geometry of Kerr Black Holes, AK Peters, New York.
- [9] Penrose, R., 1964. Gravitational Collapse and Spacetime Singularities, Physics Review Letter Volume 14, Number 3.
- [10] Visser, M., 2008, The Kerr Spacetime: a Brief Introduction, ArXiv: 0706.0622v3
- [11] Wiltshire, D.L., Visser, M., dan Scott, S.M., 2009, The Kerr Spacetime (Rotating Black Hole in General Relativity), Cambridge University Press, Cambridge



Pengembangan Prototipe Rumah DC UNPAD Sebagai Solusi Penyediaan Listrik Pedesaan

MOHAMMAD TAUFIK¹⁾ DAN TAUFIK²⁾

¹⁾FMIPA, Universitas Padjadjaran, Indonesia. ²⁾Faculty of Engineering, California Polytechnic State University, USA

ABSTRACT: This paper presents the development of a DC house prototype to demonstrate the feasibility of an alternative method for rural electrification. The DC house offers a distributed low-power low-voltage DC residential electricity rather than the legacy centralized relatively high-power high-voltage AC system. As such the DC house method is an individual or family-based approach to rural electrification. This in turn yields to an alternative solution that is scalable, affordable, and flexible. Equally important is that the DC house directly runs DC loads; thus, bypassing losses associated with the traditional AC voltage system. The development of the DC house prototype at Universitas Padjadjaran along with its system components will be presented. The house has been designed to allow a maximum capacity of 600W provided by as many as three renewable energy sources (solar, hydro, and wind). Several DC loads are in place to mimic a small house as typically found in rural areas. Recent status of the prototype including the various projects that are being undertaken to complete the house will be discussed. Plans to enhance the DC house system and for its field testing to further demonstrate its feasibility for adopting the technology will also be summarized.

KEYWORDS: DC power, off-grid power, housing, renewable energy, human-powered energy

E-MAIL: ¹⁾m.taufik@unpad.ac.id. ²⁾taufik@calpoly.edu

1 PENDAHULUAN

Sumber-sumber energi primer bagi dunia berasal dari bahan bakar fosil seperti minyak bumi, batu bara, dan gas alam. Penggunaan sumber energi ini menimbulkan masalah lingkungan. Konsumsi bahan bakar fosil adalah penyebab utama pemanasan global berupa efek gas rumah kaca. Efek negatif ini mempengaruhi kualitas kehidupan manusia di muka bumi. Kondisi ini memberikan motivasi untuk mencari sumber energi alternatif seperti sumber energi terbarukan yang tidak memancarkan gas rumah kaca.

Sumber energi terbarukan memberikan solusi jangka panjang untuk masalah tersebut. Banyak negara di dunia telah berinvestasi dalam energi terbarukan untuk menyediakan sumber energi alternatif seperti yang dilaporkan dalam Dominguez & Pascua (2009). Sumber energi terbarukan juga telah digunakan di banyak negara dunia ketiga untuk listrik pedesaan seperti di Amerika Latin (Chowdhury et al., 2009), Bangladesh (Milattanapheng et al., 2010), Lao (Dasuki et al., 1994), dan Indonesia (Seiradakis et al., 2013).

Sumber energi terbarukan yang melimpah ini tersedia secara lokal dan tersebar cukup merata di seluruh bumi. Bahkan sejumlah kecil dari energi terbarukan dapat membuat perbedaan yang signifikan di daerah terpencil dalam hal biaya. Selanjutnya, pemanfaatan sumber energi terbarukan yang

tersedia dapat menciptakan lapangan kerja dan mengurangi kecenderungan urbanisasi.

Dalam beberapa tahun terakhir telah ada upaya intensif untuk memanfaatkan sistem DC untuk melengkapi penggunaan sistem AC. Contohnya adalah sistem DC digunakan di *microgrid* dengan sumber energi terbarukan (Huang et al., 2013; Salomonsson et al., 2008), pusat data (Noriega et al., 2013), dan stasiun pengisian kendaraan listrik. Untuk listrik perumahan, sistem DC juga telah dipelajari sebagai bagian dari sistem *microgrid* DC (Shibata et al., 2011).

Untuk rumah-rumah kecil yang biasanya ditemukan di daerah pedesaan di banyak negara dunia ketiga, penggunaan sistem tegangan rendah untuk koneksi ke sumber energi terbarukan skala kecil dapat memberikan lebih banyak manfaat daripada sistem tegangan tinggi.

Proyek Rumah DC bertujuan untuk mengembangkan tegangan rendah sistem listrik DC untuk rumah kecil tunggal terutama untuk membantu dalam upaya listrik pedesaan. (Li et al., 2012).

2 KAJIAN LITERATUR

Salah satu kelemahan utama dari sumber energi terbarukan adalah bahwa operasinya bergantung pada kondisi cuaca. Oleh karena itu, sumber energi terbarukan mungkin tidak praktis jika digunakan sebagai sumber energi tunggal untuk rumah. Namun, masalah ini dapat diselesaikan dengan meng-

gunakan sistem DC yang mengintegrasikan beberapa sumber energi terbarukan, baterai, distribusi, dan beban DC, semua dalam satu sistem DC perumahan.

Selain itu karena output panel surya berupa daya DC pada tegangan yang relatif rendah, maka harus terhubung ke inverter untuk menghasilkan tegangan AC yang relatif tinggi sehingga energi dapat berguna untuk rumah AC. Konversi ini menyebabkan kerugian yang diperkirakan antara 23% hingga 28% (Walich, 2011). Listrik AC ini ketika digunakan untuk beban perumahan sebagian besar dikonversi kembali ke DC melalui proses perbaikan dalam setiap beban. Hal ini semakin menambah kerugian konversi antara 17% hingga 35%. Penggunaan sistem listrik DC dapat membantu menghilangkan kerugian konversi dari AC ke DC. Dengan sistem Rumah DC telah diperkirakan bahwa lebih dari 15% peningkatan efisiensi secara keseluruhan dapat diperoleh dibandingkan dengan sistem.

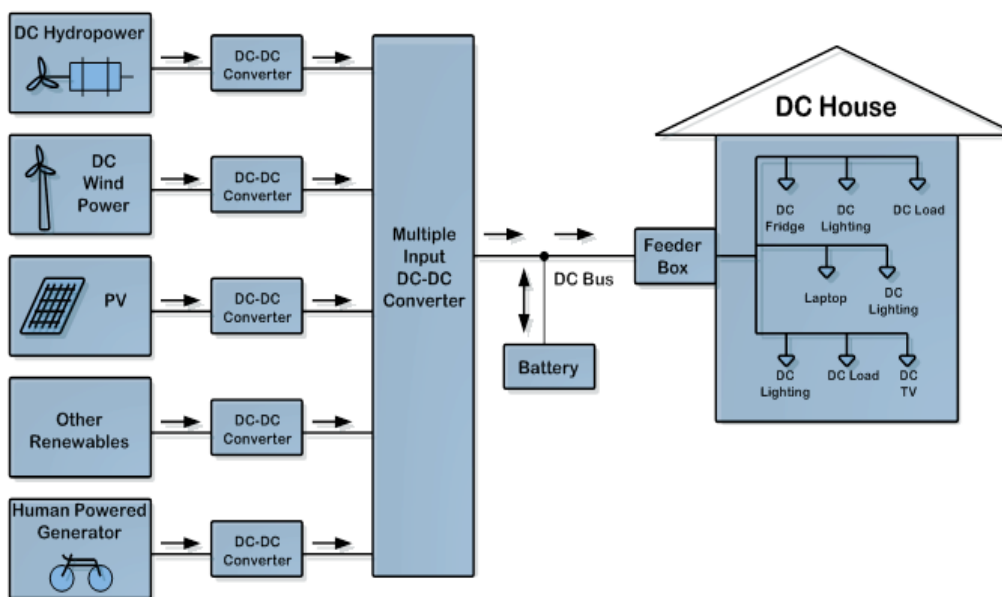
Masalah lain adalah penggunaan inverter dengan kapasitor elektrolit. Kapasitor ini memiliki umur pakai yang pendek, biasanya 5 sampai 8 tahun. Hal ini membutuhkan perawatan yang mahal dan akan menyebabkan pematian daya selama proses penggantian. Dengan sistem DC, dapat menghindari pemakaian kapasitor elektrolit, sehingga

ga membuat sistem listrik perumahan dapat beroperasi lebih efisien, handal, dan ekonomis.

3 METODE PENELITIAN

Rumah DC menggunakan satu atau beberapa sumber energi terbarukan sebagai sumber listrik. Hal ini untuk mengatasi kendala cuaca yang dimiliki sumber energi terbarukan. Rumah DC juga bisa menggunakan energi dari generator bertenaga manusia. Gambar 1 menunjukkan diagram sistem dari Rumah DC (Taufik, 2014).

Rumah DC merupakan suatu pendekatan individual atau keluarga dalam penyediaan listrik pedesaan yang memungkinkan setiap orang di pedesaan memiliki kesempatan untuk memenuhi kebutuhan listrik sesuai yang mereka mampu. Hal ini membuat Rumah DC bersifat *scalable* dan *flexible* dalam tingkatan daya listrik. Sebagian besar keluarga di daerah pedesaan yang sulit dijangkau, mereka dapat mulai menggunakan listrik dengan daya sekecil mungkin berdasarkan apa yang paling mereka butuhkan. Untuk penerangan, lampu DC yang dapat diisi ulang dengan menggunakan sinar matahari dapat menjadi awal yang baik. Saat mereka mulai menghargai manfaat listrik dan kebutuhan mereka untuk menggunakan listrik bertambah, mereka dapat membeli lampu lebih banyak yang kemudian dapat terhubung ke sistem Rumah DC.



Gambar 1. Diagram Sistem Rumah DC

Sebuah Rumah DC dirancang untuk memenuhi kebutuhan listrik yang diperlukan, seperti penerangan-

an, penyimpan makanan, televisi, lemari es, dan keperluan lainnya.

Rumah DC terdiri atas komponen-komponen, yaitu sumber energi terbarukan, *DC-DC converter*, sistem penyimpanan, sistem distribusi, dan beban.

4 HASIL DAN PEMBAHASAN

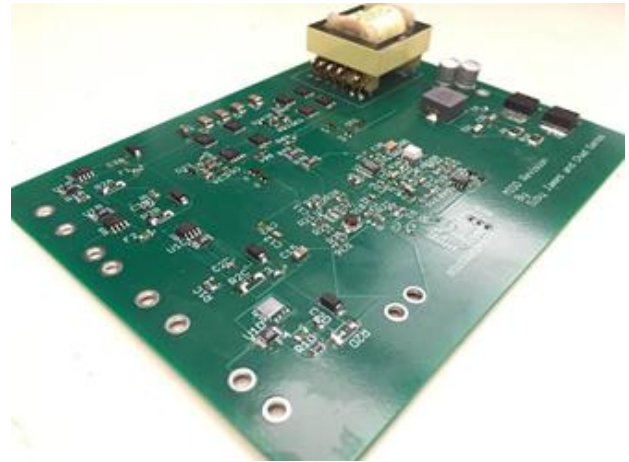
Sumber Energi Terbarukan

Mengacu pada Gambar 1, sistem Rumah DC dapat menggabungkan berbagai sumber energi, terutama dari energi terbarukan. Energi terbarukan untuk pembangkit listrik bukanlah hal yang baru. Namun, daya rendah yang dihasilkan sumber energi terbarukan untuk digunakan dalam sistem perumahan skala kecil adalah unik. Karena kebutuhan daya rendah dari Rumah DC, saat ini penting untuk dapat memanen energi dari aliran air kecil yang saat ini tidak dimanfaatkan untuk pembangkit listrik tenaga air. Ide ini menghasilkan pembangkit listrik nano-hidro portabel yang mengambil keuntungan dari aliran air kecil untuk mengisi baterai untuk digunakan di Rumah DC. Sumber lain untuk listrik Rumah DC adalah generator bertenaga manusia. Metode ini memanfaatkan tenaga manusia untuk menghasilkan listrik seperti generator sepeda. Alasan utama menggunakan sumber tersebut adalah untuk melengkapi sumber energi terbarukan yang memiliki kendala cuaca, dan untuk mempromosikan kegiatan keluarga yang menyenangkan dan sehat serta pada saat yang sama menghasilkan listrik untuk rumah DC.

DC-DC Converter

Komponen lain dari rumah DC adalah *Multiple Input Single Output (MISO) Converter* yang memung-

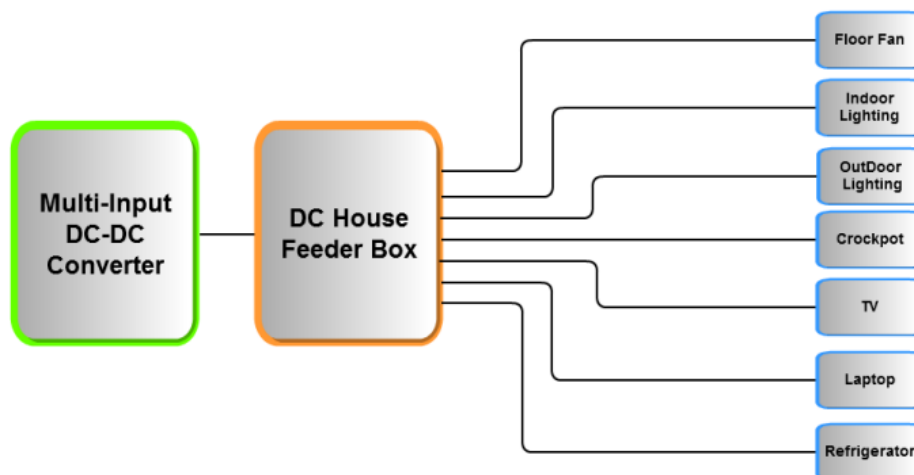
kinkan penggunaan beberapa sumber energi terbarukan untuk memastikan kelangsungan penyediaan energi untuk DC bus. MISO digambarkan dalam Gambar 2 yang saat ini dipasang di prototipe Rumah DC Unpad.



Gambar 2. MISO DC-DC Converter

Distribusi DC

Gambar 3 menunjukkan sistem distribusi daya Rumah DC, yang bertujuan untuk memberikan listrik dari beberapa sumber energi terbarukan melalui *Multi-Input DC-DC Converter* untuk satu set beban total maksimum 450 Watt. *Multi-Input DC-DC Converter* mengambil satu atau lebih masukan dari sumber energi terbarukan pada level tegangan yang berbeda dan menghasilkan satu output tegangan DC yang telah ditetapkan yaitu menjadi 48 VDC.



Gambar 3. Sistem Distribusi Rumah DC

Beban DC

Pada akhir sistem distribusi DC adalah beban DC. Untuk daerah pedesaan, beban perumahan didominasi untuk pencahayaan. Karena kemajuan teknologi LED, sekarang memungkinkan untuk memiliki bola lampu DC yang hemat energi dan murah. Prototipe Rumah DC Unpad memanfaatkan 10 lampu LED yang tersedia secara komersial. Selain itu, Rumah DC Unpad juga menyediakan USB *plugs* untuk pengisian peralatan elektronik portabel seperti ponsel, tablet, dan sebagainya.

5 SIMPULAN

Saat ini, prototipe Rumah DC Unpad siap beroperasi setelah sistem listrik lengkap menggabungkan beberapa sumber energi terbarukan. Setidaknya dua sumber energi terbarukan dipasang untuk Rumah DC Unpad, yaitu panel surya 150W dan generator angin 300W. Sistem baterai untuk memberikan daya secara terus menerus selama 12 jam. Sebanyak 4 USB *plugs* disediakan. Salah satu tantangan dalam sistem DC adalah beban DC yang tidak standar. Oleh karena itu, metode yang paling sederhana adalah menyediakan DC-DC *Converter* yang disesuaikan dengan setiap beban yang membutuhkan selain 48VDC yang berasal dari DC *bus*. Beban lain untuk Rumah DC Unpad meliputi televisi, radio, kipas angin, dan lemari es.

REFERENSI

- [1] Dominguez, J., and Pinedo-Pascua, I., 2009. GIS tool for rural electrification with renewable energies in Latin America. Proceedings of International Conference on Advanced Geographic Information Systems & Web Services, pp. 171-176.
- [2] Chowdhury, S. A., Kabir, S. M. R., Islam, S. M., 2009. Technical appraisal of solar home system equipments in Bangladesh, Proceedings of International Confe-

rence on Developments in Renewable Energy Technology, pp. 1-5.

- [3] Milattanapheng, C., Sysoulath, H., Green, J., Kurukulasuriya, M., 2010. A renewable energy strategy for Lao PDR, Proceedings of International Conference on Energy and Sustainable Development: Issues and Strategies, pp. 1-6.
- [4] Dasuki, A.S., Djamin, M., 1994. Fifty megawatt peak (50 MWp) photovoltaic rural electrification in Indonesia. IEEE World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, pp. 2379-2382.
- [5] Seiragakis, M., Pinto, R. T., Bauer, P., Damen, M., 2013. Control of an 80-kW wind turbine connected to a DC microgrid. Proceedings of 15th European Conference on Power Electronics and Applications, pp. 1-10.
- [6] Huang, Y., Peng, Y., Huang, M., Sun, J., Zha, X., 2013. Coordinate control system for photovoltaic-based DC microgrid. Proceedings of 1st International Future Energy Electronics Conference, pp. 371-375.
- [7] Salomonsson, D., Soder, L., Sannino, A., 2008. An adaptive control system for a DC microgrid for data centers. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 44, Issue 6, pp. 1910-1917.
- [8] Noriega, B. E., Pinto, R. T., Bauer, P., 2013. Sustainable DC-microgrid control system for electric-vehicle charging stations. Proceedings of 15th European Conference on Power Electronics and Applications, pp. 1-10.
- [9] Shibata, T., Sakai, K., Okabe, Y., 2011. The design and implementation of an on-demand DC Grid in Home. IEEE/IPSJ 11th International Symposium on Applications and the Internet, pp. 152-159.
- [10] Li, W., Mou, X., Zhou, Y., Marnay, C., 2012. On voltage standards for DC home microgrids energized by distributed sources. Proceedings of 7th International Power Electronics and Motion Control Conference. Wallich, P., 2011. The lightbulb that really is a better idea. IEEE Spectrum, Volume: 48, Issue: 1.
- [11] The DC House Project Website, <http://www.calpoly.edu/~taufik/dchouse>
- [12] Taufik, 2014. Rural electrification: The DC House solution. The Economist, Powering Up: Perspectives on Indonesia's Energy Future.



Iterasi Optimum pada Minimisasi Energi Biomolekul T1 Lipase dalam Pelarut Metanol

SETYANTO TRI WAHYUDI¹⁾, TONY IBNU SUMARYADA²⁾, DAN SIDIKRUBADI PRAMUDITO³⁾

Departemen Fisika - FMIPA, Institut Pertanian Bogor, Indonesia

ABSTRACT: Energy minimization defines the most stable structure. It is static point of view before doing dynamic point of view in molecular dynamic simulation. Energy minimization is a process to find local energy minimum on the potential energy surface from higher energy initial structure to minimum energy. During the process, the structure of molecules changed stepwise, removing steric hindrance and avoiding bad contact. This study aims to obtain optimum iteration for energy minimization through a combination minimization algorithm. The algorithm used in the energy minimization are Steepest Descent (SD) and Conjugate Gradient (CG). The number of iterations of each algorithm is varied by a ratio of 100%, 75%, 50%, 25% and 0% achieve minimum energy of the simulation system. Simulations using the AMBER program, with a total of 2000 and 10,000 minimizations each step. System used in this study was T1 lipase molecules which are immersed in methanol. T1 lipase is a thermostable lipase is isolated from *Geobacillus zalihae* strain from palm oil mill effluent (POME) in Malaysia. The system reaches a minimum after 900 pico-second with minimum energy -59763 kcal / mol.

KEYWORDS: Molecular Dynamic, Energy Minimization, T1 Lipase

E-MAIL: ¹⁾stwahyudi@apps.ipb.ac.id, ²⁾sumaryada@gmail.com, ³⁾sdpramudito@yahoo.com

1 PENDAHULUAN

Simulasi dinamika molekul merupakan teknik yang banyak digunakan pada simulasi sistem kompleks. Pada dinamika molekul memungkinkan atom dan molekul berinteraksi selama selang waktu tertentu dibawah pengaruh hukum fisika yang dapat menggambarkan pergerakan dari sistem kompleks atom-molekul. Saat ini dikenal 2 kelompok besar dinamika molekul, dinamika molekul klasik dan dinamika molekul kuantum yang diperkenalkan oleh Car-Parrinello pada awal tahun 1980. Metode dinamika molekul klasik telah banyak dipergunakan sejak tahun 1970 untuk mempelajari makromolekul termasuk didalamnya protein, asam nukleat membrane, dan karbohidrat [1].

Simulasi dinamika molekul menjadi penting karena dapat memberikan detail pergerakan individu partikel pada skala atomik sebagai fungsi waktu [2]. Adanya simulasi dinamika molekul kita dapat mempelajari dan memahami struktur molekul dan interaksi mikroskopik antar molekul. Disamping itu juga menjadi jembatan antara perilaku mikroskopik dengan keadaan makroskopik di laboratorium, sehingga dapat memberi prediksi hasil eksperimen [3].

Salah satu struktur molekul yang menarik dipelajari adalah struktur biomolekul lipase T1. Lipase T1 merupakan lipase yang tahan terhadap suhu tinggi [4] dan tahan terhadap pelarut organik [5]. Molekul ini diisolasi dari strain *Geobacillus zalihae* dari palm oil mill effluent (POME) Malaysia. Struktur molekul

ini telah dielusidasi dan dideposit di Protein Data Bank [6].

Tahap-tahap simulasi dinamika molekul secara garis besar terdiri dari persiapan molekul, minimisasi energi, pemanasan, ekuilibrisasi dan produksi. Minimisasi energi atau optimasi geometri merupakan tahap awal simulasi setelah molekul dipreparasi dalam pelarut dan sistem molekul-pelarut telah dinitralkan. Tahap minimisasi dilakukan dengan mengaplikasikan metode *conjugate gradient* dan atau kombinasi dengan metode *steepest descent* [7]. Metode *conjugate gradient* merupakan algoritma untuk solusi numerik sistem persamaan linear. Metode *Conjugate gradient* dapat diterapkan sebagai algoritma *iteratif* dan dapat digunakan untuk sistem yang besar dan juga dapat diterapkan pada sistem tanpa konstrain [8]. Metode ini tepat digunakan untuk sistem biomolekul di dalam pelarut.

Penelitian ini bertujuan mendapatkan kombinasi jumlah iterasi antara metode *Conjugate Gradient* (CG) dan *Steepest Descent* (SD) yang banyak digunakan pada simulasi dinamika molekul. Sistem yang akan diminimumkan energinya adalah lipase T1 yang berada di dalam pelarut metanol.

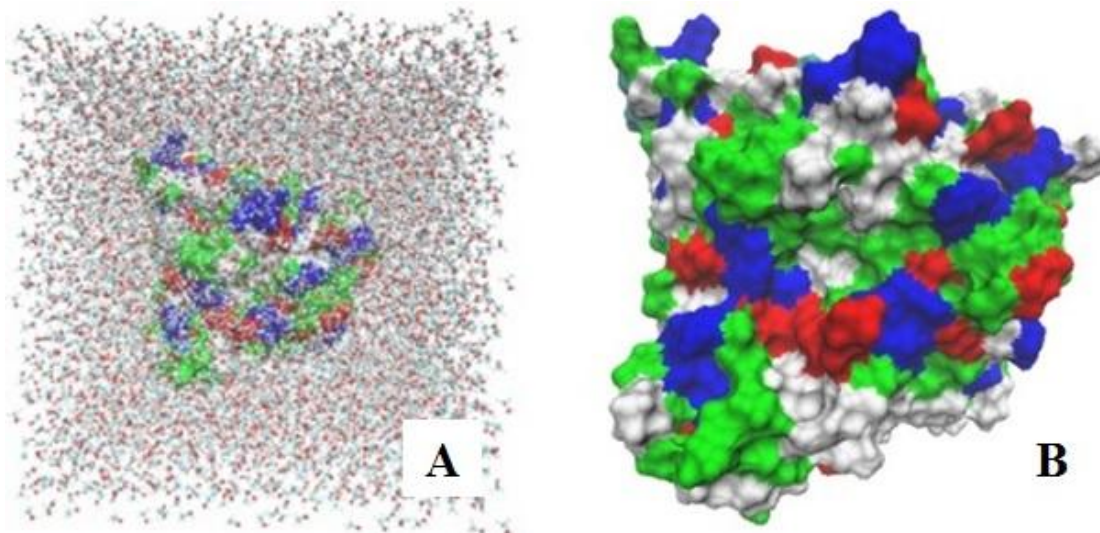
2 BAHAN DAN METODE

Bahan penelitian ini menggunakan struktur Kristal lipase T1 yang telah di deposit di Protein DataBank. Struktur ini dapat diunduh di www.rcsb.org dengan kode 2dsn.pdb. Simulasi minimisasi dilakukan dengan menggunakan mikroprosesor Intel Xeon E5-

2600 dengan frekuensi 3 GHz sebanyak 8 inti. Minimisasi energi menggunakan paket program AMBER 12 dengan *workhorse* yang digunakan *sander* [9].

Ada 2 tahap utama yang dilakukan pada pekerjaan ini, persiapan molekul dan minimisasi energi. Persiapan molekul dilakukan dengan menggunakan

perangkat *tleap* yang terdapat didalam Amber-Tools13 [10]. Pada tahap persiapan, molekul disolvasi dalam pelarut metanol dengan 8510 molekul metanol dalam *box* 14 Å (Gambar 1). Adapun netralisasi sistem memerlukan 2 ion Na^+ .



Gambar 1. Lipase T1 di dalam *box* metanol 14 Å (A), representasi tipe residu. Hijau menunjukkan netral, biru positif, merah negatif dan putih hidrofobik.

Lipase T1 terdiri dari 387 residu asam amino dan dua ion logam, kalsium (Ca^{2+}) dan Zinc (Zn^{2+}) memiliki berat molekul ~ 43 kDa. Struktur Kristal x-ray lipase T1 termasuk dalam keluarga α/β hidrolase [6].

Pada tahap minimisasi energi dilakukan 3 variasi perlakuan. a. Perlakuan dengan 1 tahap tanpa konstrain (selanjutnya disebut perlakuan *1stage*), b. Perlakuan 2 tahap, terdiri dari 1 tahap konstrain dan 1 tahap tanpa konstrain (selanjutnya disebut perlakuan *2stage*), dan c. Perlakuan 6 tahap, terdiri dari 5 tahap konstrain bertingkat dan 1 tahap tanpa konstrain (selanjutnya disebut *6stage*). Konstrain yang diberikan pada perlakuan *2stage* sebesar 1000 kcal/mol-Å². Adapun besar konstrain bertingkat pada perlakuan *6stage* berturut turut adalah 1000, 500, 100, 50, dan 10 kcal/mol-Å².

Pada perlakuan *1stage* dan *2stage*, dikerjakan dengan 2 variasi waktu 2000 siklus dan 10000 siklus pada masing-masing tahap-nya. Perlakuan *6stage*, untuk 5 tahap yang dikonstrains dikerjakan dengan variasi waktu yang sama seperti *1stage* dan *2stage*, adapun untuk tahap ke-6 tanpa konstrain dikerjakan dengan jumlah siklus yang sama dengan total siklus 5 tahap sebelumnya.

Pada setiap siklus 2000 dan 10000, diperlakukan *1stage*, *2stage* dan *6stage* dilakukan lima kombinasi iterasi metode CG:SD. Kombinasi yang dilakukan terdiri dari 100%-CG, 75%-CG, 50%-CG, 25%-CG dan 0%-CG. Kombinasi 75%-CG untuk siklus 2000 terdiri dari 500 siklus awal SD dan 1500 siklus sisanya adalah CG. Demikian selanjutnya untuk 50 dan 25%-CG dan juga untuk siklus 10000.

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

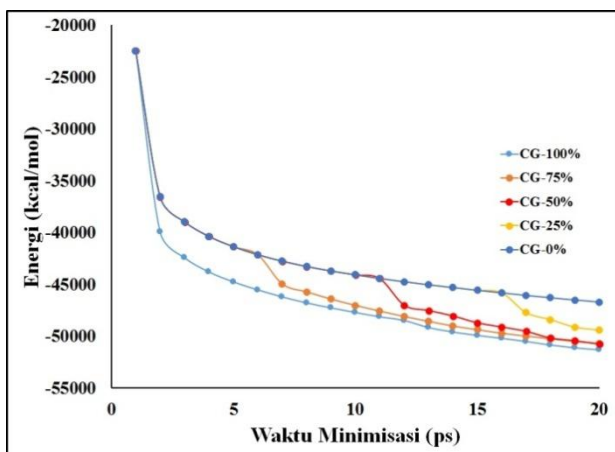
Pada perlakuan *1stage*, *Root mean square deviation* (RMSD) dari lima kombinasi CG:SD rata-ratanya 0,327 dan 0,549 Å dan RMSD tertinggi terjadi pada metode 100% *conjugate gradient*, 0,377 dan 0,647 Å masing-masing untuk siklus 2000 dan 10000. Hasil yang sama juga terjadi pada perlakuan *2stage*, RMSD tertinggi terjadi pada metode 100% *conjugate gradient* dengan nilai 0,426 dan 0,805 Å berturut-turut untuk siklus 2000 dan 10000. Hasil berbeda ditunjukkan pada perlakuan *6stage*, RMSD tertinggi untuk siklus 2000 terjadi pada kombinasi metode 100%-CG dan pada siklus 10000 terjadi pada kombinasi metode 50%-CG. Nilai RMSD yang besar menunjukkan molekul bergerak lebih fleksibel. Siklus 2000 memiliki RMSD yang rata-rata lebih kecil dibandingkan dengan RMSD pada siklus 10000. Hasil

ini mendukung dari peranan minimisasi energi, selain mencapai energi minimum, juga agar molekul lebih relaks, dan terhindar dari *bad contact*, gangguan *steric* dan lebih mudah bergerak.

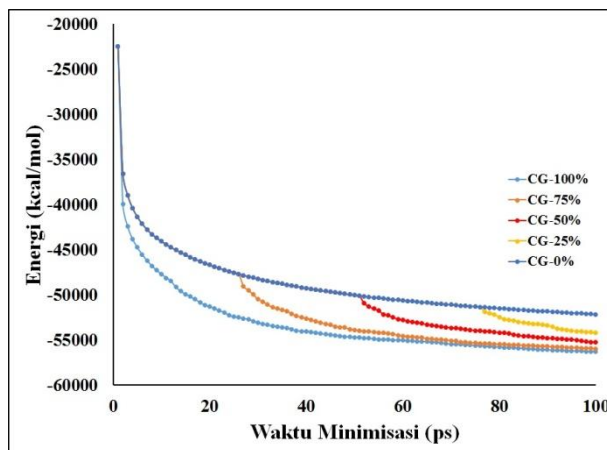
Perlakuan *1stage*, untuk siklus 2000 energi paling minimum yang dicapai oleh lima kombinasi metode adalah -51505 (100%-CG), -50894 (75%-CG), -51090 (50%-CG), -50005 (25% CG) dan -46866 kcal/mol (0%-CG). Metode 100%-CG lebih cepat menuju ke energi minimum dibandingkan dengan metode 100%-SD (0%-CG). Metode 0%-CG tidak dapat mencapai nilai minimum seperti pada 100%-CG. Kombinasi 75%-CG mengikuti pola 100%-SD hingga waktu 7 piko sekon (ps) mulai turun menuju energi minimum mengikuti pola 100%-CG. Demikian juga kombinasi 50%-CG yang menurun energinya setelah 11 ps, dan 17 ps untuk kombinasi 25%-CG (Gambar 2).

Kombinasi 75%, 50% dan 25%-CG menurun energinya secara bertahap menuju energi minimum seperti yang dicapai oleh metode 100%-CG. Pola penurunan bertahap ini lebih disukai ketika proses relaksasi. Pola yang serupa ditunjukkan juga pada siklus 10000 untuk perlakuan *1stage*.

Rentang waktu yang cukup panjang, 10000 siklus atau setara dengan 100 ps, memberikan kesempatan yang cukup untuk kombinasi 75%-CG mencapai energi minimum yang setara dengan 100%-CG setelah energinya mengalami penurunan pada 27 ps (Gambar 3). Selisih energi akhir antara 75%-CG dengan 100%-CG adalah ~300 kcal/mol hanya berbeda 0,57% saja. Namun dengan pola *shifting* energi yang bertahap kombinasi ini lebih sarankan.



Gambar 2. Grafik minimisasi energi pada perlakuan *1stage* untuk siklus 2000. Lima kombinasi metode ditunjukkan pada *Legend*.

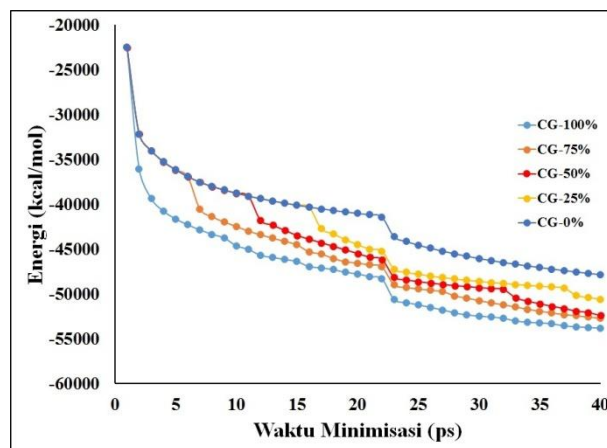


Gambar 3. Grafik minimisasi energi pada perlakuan *1stage* untuk siklus 10000. Lima kombinasi metode ditunjukkan pada *Legend*

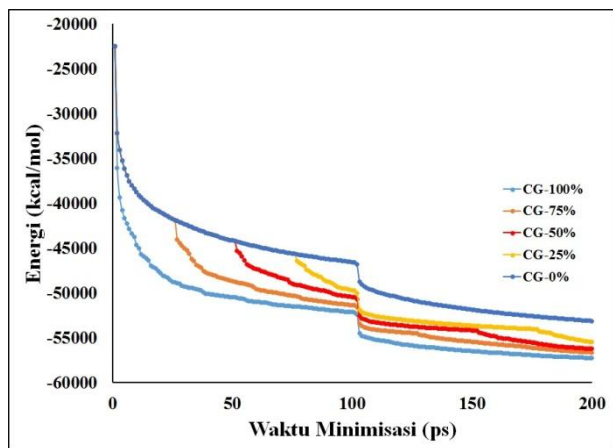
Perlakuan *2stage*, untuk siklus 2000 menunjukkan pola adanya 1 lokal minima yang ditemui (100%-CG & 0%-CG) dan 2 lokal minima untuk kombinasi 75, 50 dan 25%-CG. Metode 0%-CG atau 100%-SD masih tidak mampu mencapai energi minimum seperti pada 100%-CG (Gambar 4).

Kombinasi 75 dan 50%-CG lebih mendekati nilai 100%-CG. Energi minimum untuk 100, 75, 50, 25 dan 0%-CG berturut-turut adalah -53993, -52976, -52752, -50987 dan -48095 kcal/mol (Gambar 4).

Pola yang mirip juga ditunjukkan pada siklus 10000 untuk perlakuan *2stage*. Pada Penurunan energi pada 100% dan 0%-CG nampak terjadi setelah tahap konstrain dihilangkan yaitu setelah 100 ps. Pada keadaan terkonstrain molekul tidak dapat mencapai energi minimum, setelah konstrain dilepaskan maka terjadi penurunan energi secara bertahap (Gambar 5).



Gambar 4. Grafik minimisasi energi pada perlakuan *2stage* untuk siklus 2000. Lima kombinasi metode ditunjukkan pada *Legend*

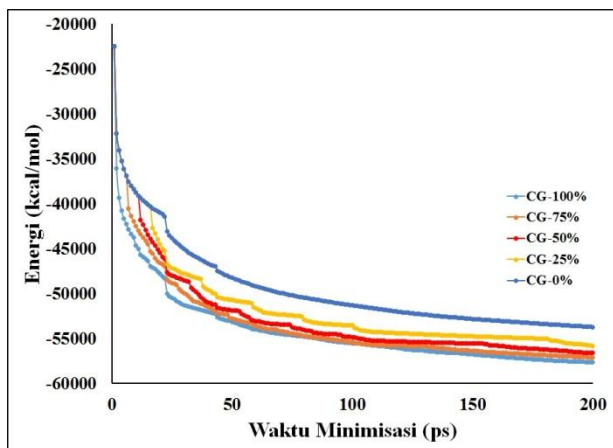


Gambar 5. Grafik minimisasi energi pada perlakuan 2stage untuk siklus 10000. Lima kombinasi metode ditunjukkan pada Legend

Pada perlakuan ini, untuk siklus 10000 diperoleh energi minimum -57295, -56667, -56254, -55553 dan -53142 kcal/mol masing-masing untuk kombinasi 100%, 75%, 50%, 25% dan 0%-CG. Selisih antara 100% dengan 75%-CG hanya ~1.1%. Adapun selisih energi antara metode 100%-CG dengan 0%-CG adalah ~7% (Gambar 4).

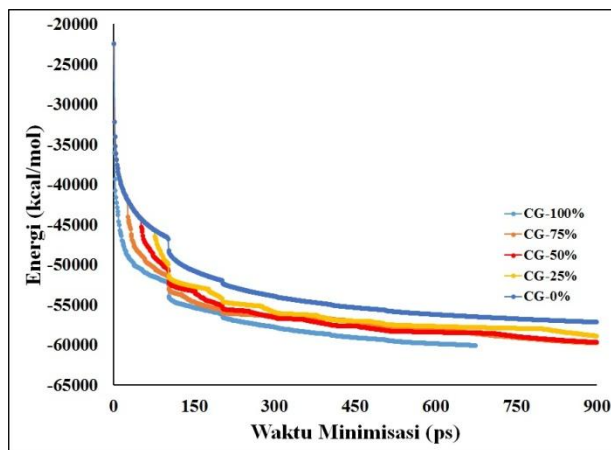
Pola penurunan energi akibat perlakuan 6stage, dimana 5 tahap awal sistem diberi konstrain secara bertingkat dan setiap tahap dijalankan untuk siklus 2000 ditunjukkan pada Gambar 6. Metode 100%-CG masih merupakan metode dengan energi paling minimum dengan selisih ~7% dengan metode 0%-CG. Nilai energi minimum untuk 100%-CG adalah -57664 kcal/mol dan -53792 kcal/mol untuk metode 0%-CG.

Pada perlakuan ini, terjadi juga penurunan energi beberapa kali setelah konstrain dikurangi secara perlahan. Penurunan energi beberapa tahap terlihat pada kombinasi 75, 50 dan 25%-CG. Kombinasi 75%-CG menunjukkan pencapaian energi minimum yang paling dekat dengan 100%-CG (Gambar 6).



Gambar 6. Grafik minimisasi energi pada perlakuan 6stage untuk siklus 2000. Lima kombinasi metode ditunjukkan pada Legend

Pola yang sama untuk perlakuan 6stage, juga ditunjukkan pada siklus 10000 (Gambar 7). Hal menarik ditunjukkan pada grafik 100%-CG ketika waktu 673 ps proses minimisasi berhenti. Program AMBER menunjukkan sudah tidak mampu lagi mendapatkan nilai yang lebih minimum lagi. Energi minimum pada metode 100%-CG tersebut -60027 kcal/mol merupakan energi yang paling minimum dibandingkan kombinasi 75%-CG meskipun terhenti pada 673 ps.



Gambar 7. Grafik minimisasi energi pada perlakuan 6stage untuk siklus 10000. Lima kombinasi metode ditunjukkan pada Legend

Kombinasi 75%-CG memiliki selisih energi hanya 4,3% lebih rendah di bandingkan metode 100%-CG. Energi minimum yang dicapai oleh kombinasi 50 dan 25%-CG adalah -59678 dan -58893 kcal/mol. Adapun selisih energi minimum antara 100% dengan 0% CG adalah 4,7%. Selisih ini lebih baik dibandingkan perlakuan 1stage dan 2stage yang berkisar pada 7%.

Lamanya waktu minimisasi berdampak pada energi minimum yang dicapai semakin rendah. Lama waktu juga yang menyebabkan metode 0%-CG atau 100% steepest descent semakin menurun energinya dan memperkecil jaraknya dengan metode 100%-CG.

4 KESIMPULAN

Keadaan tanpa konstrain dengan metode conjugate gradient terlihat cepat mencapai minimum namun demikian untuk sistem yang besar lebih disukai proses penurunan energi secara bertahap. Untuk itu pola penerapan konstrain bertingkat dapat dilakukan pada sistem ini dengan kombinasi 75%-CG. Kombinasi metode 75%-CG merupakan iterasi yang

optimum karena dapat mendekati energi minimum seperti pada 100%-CG namun masih mengalami proses penurunan energi bertahap. Disamping itu penggunaan 10000 siklus juga memberikan hasil optimum untuk minimisasi energi.

REFERENSI

- [1] R. Petrenko and J. Meller, "Molecular Dynamics," in *Encyclopedia of Life Sciences*, vol. 39, Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2010, pp. 1–88.
- [2] M. Karplus and J. A. McCammon, "Molecular dynamics simulations of biomolecules.," *Nat. Struct. Biol.*, vol. 9, no. 9, pp. 646–52, Sep. 2002.
- [3] M. Allen, "Introduction to molecular dynamics simulation," *Comput. Soft Matter From Synth. Polym. to ...*, vol. 23, no. 2, pp. 1–28, 2004.
- [4] R. Abedi Karjiban, W. Z. Lim, M. Basri, and M. B. Abdul Rahman, "Molecular dynamics of thermoenzymes at high temperature and pressure: A review," *Protein J.*, vol. 33, no. 4, pp. 369–376, 2014.
- [5] [5] T. C. Leow, R. N. Z. R. A. Rahman, M. Basri, and A. B. Salleh, "A thermoalkaliphilic lipase of *Geobacillus* sp. T1," *Extremophiles*, vol. 11, no. 3, pp. 527–535, 2007.
- [6] [6] H. Matsumura, T. Yamamoto, T. C. Leow, T. Mori, A. B. Salleh, M. Basri, T. Inoue, Y. Kai, and R. N. Z. R. A. Rahman, "Novel cation-pi interaction revealed by crystal structure of thermoalkaliphilic lipase.," *Proteins*, vol. 70, no. 2, pp. 592–8, Feb. 2007.
- [7] M. E. Davis and J. A. McCammon, "Solving the finite difference linearized Poisson-Boltzmann equation: A comparison of relaxation and conjugate gradient methods," *J. Comput. Chem.*, vol. 10, no. 3, pp. 386–391, Apr. 1989.
- [8] M. R. Hestenes and E. Stiefel, "Methods of conjugate gradients for solving linear systems," *J. Res. Natl. Bur. Stand. (1934)*, vol. 49, no. 6, p. 409, Dec. 1952.
- [9] P. A. K. D. A. Case, T. A. Darden, T. E. Cheatham, C. L. Simmerling, J. Wang, R. E. Duke, R. Luo, R. C. Walker, W. Zhang, K. M. Merz, B. Roberts, S. Hayik, A. Roitberg, G. Seabra, J. Swails, A. W. Goetz, I. Kolossváry, K. F. Wong, F. Paesani, J. Vanicek, R. M. Wolf, "Amber 12," *Univ. California, San Fr.*, 2012.
- [10] R. D.A. Case, T.A. Darden, T.E. Cheatham, III, C.L. Simmerling, J. Wang, R.E. Duke, G. S. Luo, R.C. Walker, W. Zhang, K.M. Merz, B. Roberts, S. Hayik, A. Roitberg, J. L. J. Swails, A.W. Götz, I. Kolossváry, K.F. Wong, F. Paesani, J. Vanicek, R.M. Wolf, G. X. Wu, S.R. Brozell, T. Steinbrecher, H. Gohlke, Q. Cai, X. Ye, J. Wang, M.-J. Hsieh, T. Cui, D.R. Roe, D.H. Mathews, M.G. Seetin, R. Salomon-Ferrer, C. Sagui, V. Babin, and P. A. K. Luchko, S. Gusarov, A. Kovalenko, "AmberTools13," *Univ. California, San Fr.*, 2012.



Effects of Different Laser Wavelength on Fluorescence Intensity of Loosed Palm Oil Fruits

MINARNI SHIDDIQ* DAN ANNESA AULIYA**

Laboratorium Fotonik, Jurusan Fisika, FMIPA, Universitas Riau, Jl. HR. Soebrantas km 12,5 Pekanbaru 28293, Indonesia

INTISARI: *Fluorescence imaging* telah dikembangkan sebagai metode tidak merusak untuk mendeteksi kualitas buah dan sayur serta kandungan yang terdapat pada buah dan sayur. Ada banyak kandungan yang dapat dilihat dengan menggunakan laser berdasarkan *Fluorescence imaging* seperti kandungan klorofil dan warna pigmen lainnya yang menandakan warna dan kematangan buah. Cara mendeteksi kandungan ini tergantung pada eksitasi panjang gelombang dari laser yang digunakan. Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari efek dari dua panjang gelombang yang berbeda dari laser dioda yang digunakan untuk sistem fluoresensi *imaging* pada buah kelapa sawit. Sistem ini terdiri dari dua laser dioda dengan panjang gelombang 405 nm dan 650 nm dan sebuah kamera monokrom dengan beberapa filter warna. Filter biru untuk laser dioda dengan panjang gelombang 405 nm dan filter jingga untuk panjang gelombang 650 nm. Sampel buah kelapa sawit dari varietas Tenera dengan nama Lonsum diambil dari bagian luar tandan kelapa sawit. Sampel terdiri dari empat tingkat kematangan f0, f1, f2, dan f3 masing-masing dengan 3 brondolan kelapa sawit. Gambar buah yang diambil dianalisa menggunakan software *imaging*. Hasil riset menunjukkan bahwa intensitas fluoresensi yang diwakili oleh *gray values* untuk empat tingkat kematangan berbeda. Laser dioda warna merah 650 nm menghasilkan *gray values* lebih rendah dibandingkan laser violet 405 nm 3%-7%. Hasil ini sesuai dengan fakta bahwa pigmen molekul buah lebih menyerap warna merah dibanding warna ungu.

KATA KUNCI: *Fluorescence Imaging* berbasis laser, *Loosed-Palm Oil Fruits*, *Ripeness*, *Wavelength Dependence*, *ImageJ*

ABSTRACT: Fluorescence Imaging has been developed as a nondestructive method for assessing fruit and vegetable qualities and attributes. There are many attributes can be accessed using a laser based fluorescence imaging such as chlorophyll content and other pigments responsible for fruit colors and ripeness. The assessment of these attributed depends on the wavelength of excitation lasers used. This research was aimed to study the effects of two different wavelengths of diode lasers applied to a fluorescence imaging system of loosed palm oil fresh fruits. The system consisted of two diode lasers each with 405nm and 650 nm wavelength respectively and a monochrome camera with some color filters. The filters used were a blue filter for 405 nm diode laser and an orange filter for 650 nm laser. The samples were loosed palm oil fresh fruits from Tenera variety named Lonsum and taken from the outer layer of palm oil fresh fruit bunches. The samples had four levels of ripeness, f0, f1, f2, and f3 each had 3 loosed fruits. The recorded fruit images were analyzed using ImageJ software. The gray values which represented as fluorescence intensities for four ripeness categories and wavelengths were compared. The results showed that both wavelengths resulted different fluorescence intensities for the three ripeness levels. The red diode laser with 650 nm resulted lower gray values by 3%-7% compared to those of violet laser with 405 nm wavelength. These result agreed with the fact that fluorescence of pigment molecules in fruit tissue absorbed more red light.

KEYWORDS: Laser-based Fluorescence Imaging, Loosed-Palm Oil Fruits, Ripeness, Wavelength Dependence, ImageJ

E-MAIL: *email: minarni@unri.ac.id, **email: auliyaannesa@yahoo.co.id

1 PENDAHULUAN

Beberapa masalah yang dijumpai pada tanaman kelapa sawit antara lain adalah penyakit, penentuan kematangan, penyortiran, dan penyimpanan. Penyakit pada tanaman dapat disebabkan oleh gulma dan jamur. Penyakit tersebut menyebabkan perkembangan tanaman kelapa sawit terhambat dan mematikan tanaman secara perlahan. Penentuan kematangan kelapa sawit penting untuk diketahui karena kematangan dapat menentukan hasil minyak maksimum. Hasil minyak maksimum terdapat pada buah yang mulai lepas atau berondolan. Penentuan panen mempengaruhi kandungan asam

lemak bebas (ALB) pada minyak. Buah yang dipanen pada keadaan lewat matang persentase ALB nya akan meningkat. Penyortiran dilakukan pada saat buah kelapa sawit telah selesai dipanen, kesalahan dalam penyortiran menyebabkan rendahnya produksi dan tidak memenuhi permintaan pabrik. Buah kelapa sawit yang telah disortir harus segera dibawa ke pabrik. Penyimpanan yang dilakukan pada buah kelapa sawit setelah di panen dapat menyebabkan buah menjadi lewat matang bahkan mengalami kebusukan^[1].

Tingkat penentuan kematangan sangat berpengaruh dalam usaha perkebunan buah kelapa sawit. Penentuan kematangan buah yang tepat dilakukan

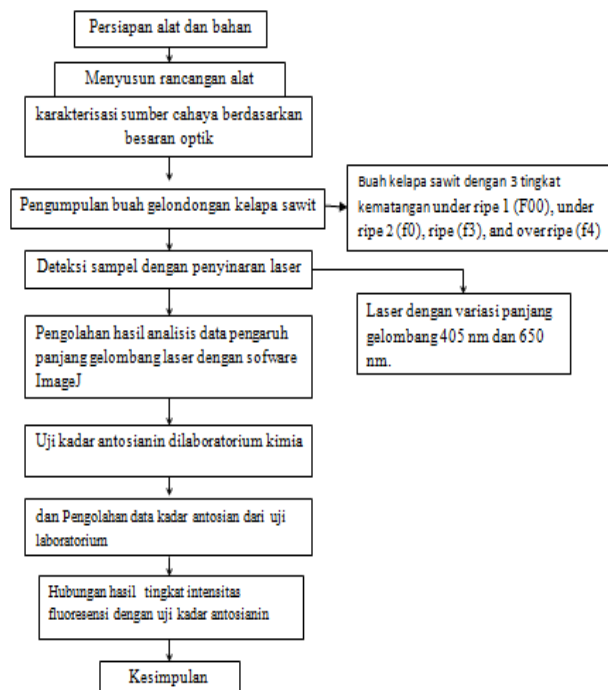
untuk mengetahui kapan buah tersebut dapat dipanen, karena buah yang belum mencapai kematangan tidak dapat memenuhi kualitas yang diinginkan oleh pabrik.^[2] Penentuan kematangan telah dilakukan secara manual dan secara optik. Penentuan kematangan untuk pabrik secara manual menggunakan 3 fraksi yaitu *under ripe* (mentah), *ripe* (matang), dan *over ripe* (lewat matang). Kematangan secara manual dapat ditentukan dengan melihat warna dan jumlah berondolan yang jatuh dari tandan. Kematangan secara optik telah dikembangkan menggunakan mesin *vision non-destruktif*, cepat, dan efektif. Mesin *vision* dapat digunakan untuk menentukan tingkat kematangan, kandungan minyak, dan kadar asam lemak bebas pada kelapa sawit^[3]. *Computer vision* adalah teknologi yang digunakan untuk menganalisa gambar dan mengolah data dengan cepat, akurat, dan dapat menentukan kualitas buah dalam bentuk ukuran, warna, tingkat kecatatan, dan kematangan.^[4]

Penentuan kematangan juga dapat dilakukan dengan menggunakan metode *fluorescence imaging*. *Fluorescence imaging* adalah metode yang menggunakan komponen-komponen optik seperti sumber cahaya yaitu laser, lensa dan kamera sebagai detektor. Pengembangan sistem atau metode *Fluorescence Imaging* untuk mendeteksi tingkat kematangan pada buah sangat diperlukan. Diagnosa buah pear yang dilakukan di laboratorium CEOT dengan sumber penyinaran menggunakan laser AR-ion pada panjang gelombang 475 nm dengan menggunakan metode *fluorescence imaging*^[5]. Penelitian ini akan merancang sistem optik pencitraan fluoresensi yang digunakan untuk mendeteksi hubungan antara interaksi fluoresensi dan tingkat kematangan pada buah kelapa sawit. Penelitian dilakukan untuk mengetahui panjang gelombang sumber cahaya yang efisien agar didapat interaksi fluoresensi dan tingkat kematangan yang sesuai. Penyinaran dilakukan dengan laser dioda pada panjang gelombang yang bervariasi. Kemudian akan dianalisa pengaruh panjang gelombang dalam pendeteksian hubungan antara interaksi fluoresensi dan tingkat kematangan buah kelapa sawit menggunakan *Fluorescence Imaging*.

2 METODE PENELITIAN

Penelitian menggunakan metode *fluorescence imaging* dengan sumber cahaya laser dioda merah 650 nm dengan filter jingga rentang panjang gelombang 535-900 nm dan laser dioda ungu 405 nm dengan filter biru rentang panjang gelombang 426,44-519,33 nm. Detektor menggunakan kamera mono-

krom. Gambar 1 menunjukkan diagram alir penelitian.



Gambar 1. Diagram Alir penelitian

Rancangan skema penelitian ini disusun di dalam kotak berwarna hitam kedap cahaya berbahan akrilik dengan ukuran 60 × 90 cm. Jarak laser ke kamera 17.5 cm jarak kamera ke sampel 30cm. Cahaya laser membentuk sudut 30° dari garis antara buah sawit dan tengah kamera.

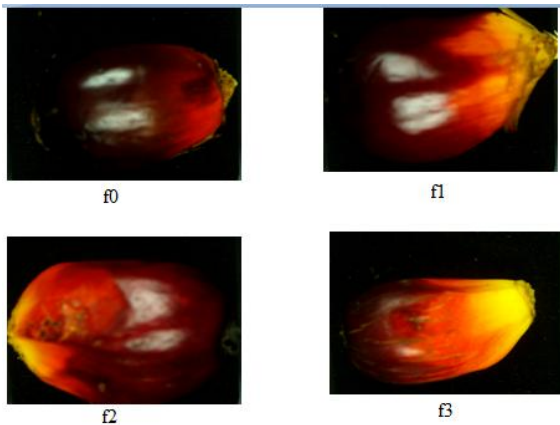
Penelitian diawali dengan pengumpulan buah kelapa sawit dengan tiga tingkatan kemasakan yaitu *under ripe*, *ripe*, dan *over ripe* yang ditentukan oleh petani di perkebunan. Kemudian dibuat rancangan untuk sistem *fluorescence imaging* yang terdiri dari laser dengan dengan panjang gelombang 650 nm dan 405 nm, filter warna jingga dan biru sebagai detektor kamera monokrom, kemudian dihubungkan ke komputer, dan hasilnya akan diolah oleh program komputer yang disebut dengan *ImageJ*. Pada sampel dilakukan deteksi *Fluorescence Imaging* untuk menentukan pengaruh panjang gelombang laser dalam pendeteksian tingkat kematangan buah kelapa sawit.

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengamatan dari penelitian menunjukkan hubungan intensitas dengan tingkat kematangan menggunakan sumber cahaya laser dioda merah 650 nm dan laser dioda ungu 405 nm.

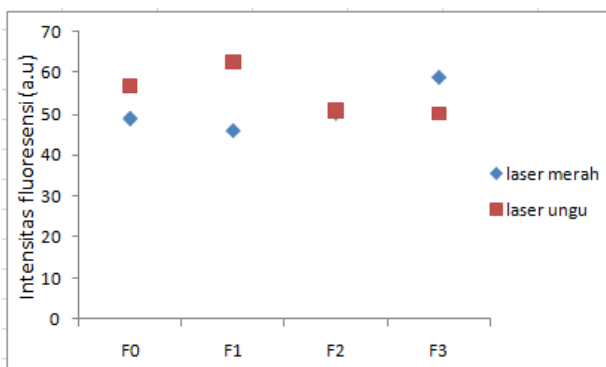
Gambar 2 merupakan gambar RGB (*Red, Green, and Blue*) buah sawit fraksi F0, F1, F2, F3. Setiap

fraksi terdiri dari 3 sampel yang mewakili bagian pangkal, tengah, dan ujung tandan sawit.

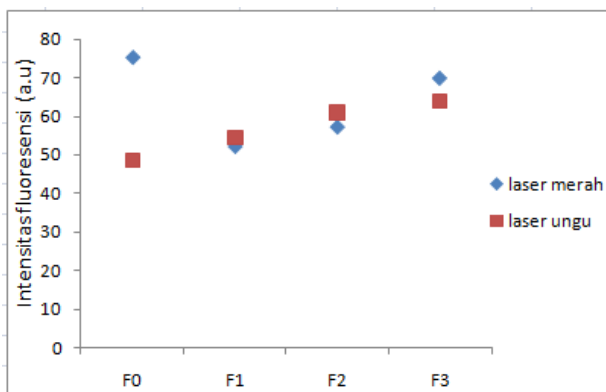


Gambar 2 Buah kelapa sawit

Gambar 3 adalah grafik intensitas fluoresensi yang diwakili oleh *gray values* setiap gambar. Untuk setiap fraksi menggunakan panjang gelombang laser yang berbeda untuk buah bagian pangkal intensitas tertinggi diwakili oleh laser ungu fraksi f1 untuk laser merah oleh f3.

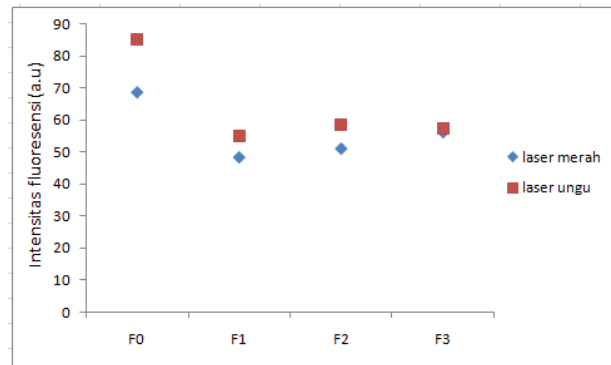


Gambar 3. Grafik intensitas fluoresensi rata-rata setiap fraksi bagian pangkal



Gambar 4. Grafik intensitas fluoresensi rata-rata setiap fraksi bagian tengah

Gambar 4 menunjukkan intensitas fluoresensi terhadap fraksi untuk buah pada bagian tengah laser merah menghasilkan intensitas lebih tinggi pada fraksi f0.



Gambar 5. Grafik intensitas fluoresensi rata-rata setiap fraksi bagian ujung

Gambar 5 menunjukkan bahwa untuk kedua laser intensitas tertinggi diperoleh oleh fraksi f0 ini dapat disebabkan oleh kandungan pigmen pada buah seperti klorofil dan antosianin yang tinggi pada keadaan buah belum matang.

4 SIMPULAN

Laser dioda ungu menghasilkan *gray values* lebih tinggi dibandingkan laser dioda merah pada bagian buah pangkal dan ujung. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pigmen molekul pada buah kelapa sawit bagian pangkal dan ujung menyerap lebih banyak warna merah dibandingkan warna ungu.

REFERENSI

- [1] Hazir, M. H. M, Abdul, R. M. S., Mohd, D. A. 2012. Determination of Oil Palm Fresh Fruit Bunch Ripeness-Based on Flavonoids and Antocyanin Content. *Industrial crops and Product*. 36:466-475.
- [2] Reid, M. S. 2002. *Maturation and Maturity Indices. Postharvest Technology of Horticultural Crops*. Hal: 52-62.
- [3] Makky, M., Peeyush S., Vilas M. S. 2014. Automatic Non-destructive Quality Inspection System for Oil Palm Fruits. *Int. Agrophys*. 28: 319-329.
- [4] Ayman H., Amer E., Ayman A., Abdel K. 2012. Understanding Color Image Processing by Machine Vision for Biological Materials. *Intech open science*. 10: 227-229
- [5] Cavaco, A. M. Antunes, D. Marques da Silva, J. Antunes, R. C Guerra, R. 2002. Priliminary Result on the Non-invasive Diagnosis of Superficial Scald 'Rocha' Pear by Fluorescence Imaging. *Leibniz-Institut Fur Agrartechnik Potsdam-Bornim e. V. (ATB), Portugal*.

Pembuatan Kalsium Karbonat (CaCO_3) Berbasis Cangkang Bekicot (*Achatina Fulica*) dengan Teknik Kalsinasi Sebagai Bahan Baku Biokeramik

DWI ASMI, DESTY WULAN NENIATI, ANISA NURDIANA, DAN HELRITA MAULINA

Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung, Jl. Prof. Sumantri Brojonegoro No.1 Gedung Meneng, Bandar Lampung 35145, Indonesia

ABSTRACT: The snail shell (*Achatina fulica*) is one source of natural calcium carbonate. In this research, the processed of snail shell powder is calcined at 500 °C and 800 °C for 3 hours. The Differential Thermal and Thermogravimetric Analysis (DTA/TG), X-ray Diffraction (XRD) and Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) techniques used to characterize the sample. The results of thermal analysis DTA/TG showed CaCO_3 snail shell begins to decompose into CaO at temperature of 743 °C through an endothermic reaction. XRD analysis results shows that evolution of aragonite phase to calcite occurred at 500 °C and decompose to CaO at 800 °C. FTIR analysis results indicate the presence of carbonate functional groups CO_3^{2-} in the sample.

KEYWORDS: Snail shell (*Achatina fulica*), aragonite, calcite, CaO, calcination, bioceramics

E-MAIL: dwiasmi82@yahoo.com

1 PENDAHULUAN

Bekicot berasal dari daerah Afrika Timur, yang tersebar sampai ke Indonesia dan berkembang biak dengan cepat (Pracaya, 2008). Bekicot banyak ditemukan di negara-negara beriklim tropis yang hangat, dan memiliki suhu ringan sepanjang tahun, serta tingkat kelembaban tinggi (Venette *et al.*, 2004). Spesies ini dapat hidup di daerah pertanian, wilayah pesisir, lahan basah, hutan alami, semak belukar, dan daerah perkotaan serta bekicot dapat hidup secara liar di hutan maupun di perkebunan atau tempat budidaya (Raut *et al.*, 2002). Bekicot memiliki banyak sekali manfaat dalam kehidupan sehari-hari, seperti lendir bekicot sering digunakan untuk mengobati luka eksternal karena lendir bekicot mengandung *glicosamignolycan* yang berperan dalam proses penyembuhan luka (Dewi, 2010). Kemudian, daging bekicot dapat digunakan sebagai pakan ternak karena tepung daging bekicot mengandung banyak protein (Sahara dkk, 2009), selain itu daging bekicot merupakan sumber protein (82.96%) dan mineral baik dengan lemak rendah, serta dapat dikonsumsi untuk meningkatkan kesehatan manusia (Engmann *et al.*, 2013). Namun yang akan dimanfaatkan dalam penelitian ini untuk meningkatkan nilai ekonomis dari bekicot adalah cangkang bekicot karena cangkang bekicot banyak mengandung kalsium karbonat (CaCO_3) (Fernianti, 2008). Kandungan kalsium karbonat yang terdapat pada suatu cangkang bekicot berkisar antara 89-99% (Qoniah dkk, 2010). Kemudian menurut Saputra (2012), berdasarkan hasil analisa difraksi sinar-x yang telah dilakukan diketahui bahwa cangkang bekicot hampir 98% terdiri dari senyawa kalsium

karbonat. Menurut Cobbinah (2008), pada cangkang atau kulit bagian atas (*visceral*) inilah yang mengeluarkan zat kapur. Hal inilah yang mengakibatkan 98% cangkang terdiri dari kalsium karbonat. Menurut Ireland (1991) banyaknya jumlah kalsium yang terdapat dalam cangkang bekicot dapat dipengaruhi oleh kadar kandungan kalsium yang terdapat dalam makanan yang dikonsumsi oleh bekicot, dan banyaknya kandungan kalsium pada pakan bekicot juga dapat mempengaruhi ketebalan dari suatu cangkang bekicot (Kalio *et al.*, 2010). Variasi kandungan kalsium karbonat yang berbeda pada cangkang bekicot inilah yang menarik perhatian peneliti untuk melakukan studi tentang pembuatan bubuk kalsium karbonat berbasis limbah biomaterial cangkang bekicot dengan teknik kalsinasi.

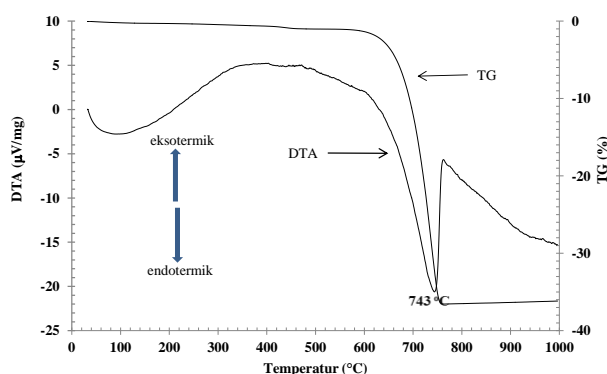
2 METODE PENELITIAN

Sampel limbah cangkang bekicot yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari daerah perkebunan tebu Gunung Madu kabupaten Lampung Tengah Propinsi Lampung. Cangkang bekicot yang diperoleh dibersihkan dan direbus selama 5 jam dengan menggunakan aquades. Cangkang bekicot hasil perebusan dicuci kembali dengan 5 % larutan asam sulfat (H_2SO_4) dengan menggunakan sikat tujuannya adalah untuk membersihkan kotoran yang menempel pada kerang tersebut, dan dilanjutkan dengan membersihkan dengan aquades dan pengeringan dalam oven pada suhu 100 °C selama 12 jam. Cangkang bekicot yang sudah bersih kemudian digerus dengan menggunakan mortar dan pestle agar menjadi pecahan yang lebih kecil dan diblender selama 2 jam untuk menghasilkan bubuk cangkang

bekicot yang lebih halus. Sampel bubuk cangkang bekicot yang telah halus diayak menggunakan ayakan dengan ukuran 35 μm dan di kalsinasi pada suhu 500 °C dan 800 °C dengan laju pembakaran 5 °C/menit dengan waktu penahanan selama 3 jam kemudian penurunan ke suhu ruang. Karakterisasi sifat termal pada sampel sebelum dikalsinasi dilakukan dengan menggunakan alat simultan thermal analyzer (Netzsch, STA 409) pada rentang suhu 20 – 1000 °C dengan laju pembakaran 10 °C/menit. Analisis struktur kristal pada sampel bubuk cangkang bekicot sebelum dan sesudah dikalsinasi dilakukan dengan alat difraktometer sinar-x (PW3040/60 X'pert Pro) menggunakan radiasi $\text{CuK}\alpha$, tegangan 40 kV dan arus 30 mA dengan 2 theta pada rentang 5-80°. Analisis gugus fungsional dilakukan dengan menggunakan spektrometer FTIR (Perkin Elmer Optima 100).

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

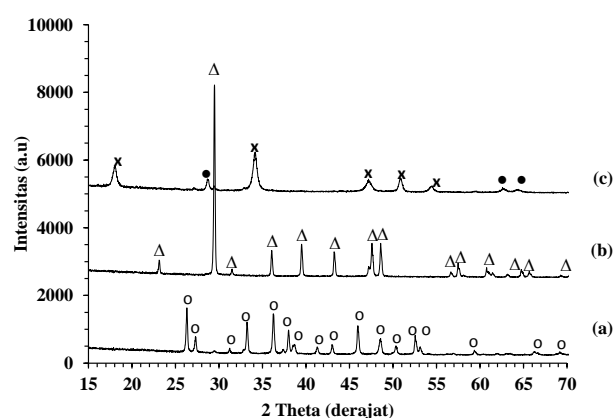
Gambar 1 menunjukkan grafik analisis termal DTA/TG bubuk cangkang bekicot. Pada grafik TGA terdapat satu tahapan penyusutan massa yang besar yaitu sebesar 40,68% pada suhu rentang suhu 600-750 °C dikarenakan dekomposisi fasa CaCO_3 menjadi CaO dengan puncak endotermik seperti ditunjukkan pada grafik DTA terjadi pada suhu 743 °C. Hasil ini serupa dengan pengamatan Birla *et al* (2012) pada cangkang siput yang mengalami penurunan masa sampel sebesar 42,7% akibat perlakuan termal pada suhu 750 °C.



Gambar 1. Grafik DTA/TG sampel cangkang bekicot pada rentang suhu 20-1000 °C dengan kelajuan 10 °C/menit.

Hasil karakterisasi difraksi sinar-x (XRD) cangkang bekicot sebelum dan sesudah kalsinasi ditunjukkan pada Gambar 2. Gambar 2a menunjukkan grafik pola difraksi sinar-x (XRD) pada sampel sebelum kalsinasi, dapat dilihat bahwa cangkang bekicot sebelum dikalsinasi sepenuhnya terdiri dari kalsium karbonat (CaCO_3) dengan fasa *aragonite* dengan puncak intensitas tertinggi terdapat pada $2\theta =$

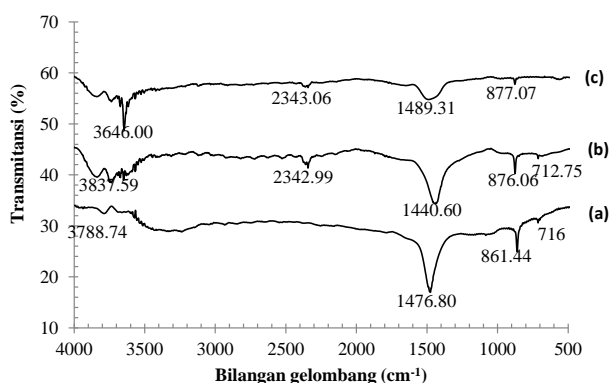
26,28°, 36,23° dan 45,94°. Puncak intensitas serupa juga diperoleh pada penelitian sebelumnya oleh Birla *et al* (2012) pada cangkang bekicot sebelum kalsinasi yaitu pada $2\theta = 26,24^\circ, 33,17^\circ$ dan $45,89^\circ$. Pada suhu kalsinasi 500 °C cangkang bekicot memiliki fasa yang berbeda yaitu *calcite* dengan puncak tertinggi terletak pada $2\theta = 29,45^\circ, 48,57^\circ$ dan $47,56^\circ$. Pada suhu kalsinasi 800 °C fasa CaCO_3 terdekomposisi menjadi kalsium oksida CaO yang terdapat pada $2\theta = 27,14^\circ, 28,69^\circ, 29,41^\circ, 62,68^\circ$ dan $64,28^\circ$. Puncak CaO serupa juga diamati oleh Lesbani *et al* (2013) pada $2\theta = 32,20^\circ, 58,30^\circ$ dan $64,10^\circ$. Selain CaO , terdapat puncak dari fasa lain yang muncul pada karakterisasi ini yaitu kalsium hidroksida Ca(OH)_2 pada $2\theta = 18,00^\circ, 34,11^\circ, 47,17^\circ, 50,82^\circ, 54,36^\circ, 59,36^\circ$. Munculnya fasa Ca(OH)_2 pada proses kalsinasi suhu 800 °C ini dikarenakan interaksi antara CaO dengan uap air di udara setelah proses dekomposisi sampel (Lesbani *et al*, 2013).



Gambar 2. Pola difraksi sinar-x pada sampel cangkang bekicot (a) sebelum kalsinasi, (b) kalsinasi pada suhu 500 °C, dan (c) kalsinasi pada suhu 800 °C. Simbol o = CaCO_3 aragonite, $\Delta = \text{CaCO}_3$ calcite, $\bullet = \text{CaO}$, dan x = Ca(OH)_2

Gambar 3 menunjukkan pola spektra FTIR sampel cangkang bekicot (a) sebelum kalsinasi, (b) kalsinasi pada suhu 500 °C, dan (c) kalsinasi pada suhu 800 °C. Grafik karakterisasi FTIR cangkang bekicot sebelum kalsinasi diperlihatkan pada Gambar 3a. Bilangan gelombang 3788,74 cm^{-1} menunjukkan gugus fungsi O-H. Gugus O-H dari kalsium karbonat standar juga ditemukan pada rentang bilangan gelombang 4000 cm^{-1} -2950 cm^{-1} (Umbreit *et al*, 2000). Kemudian pada bilangan gelombang 761 cm^{-1} , 861,44 cm^{-1} dan 1476,80 cm^{-1} menunjukkan adanya gugus fungsi CO_3^{2-} . Hal ini berdasarkan pada penelitian Birla *et al* (2012) bahwa gugus fungsi senyawa CO_3^{2-} dari cangkang siput ditemukan pada bilangan gelombang 864,14 cm^{-1} dan 1479,45 cm^{-1} . Puncak serupa juga ditemukan pada penelitian Lesbani *et al* (2013) yaitu pada 709 cm^{-1} yang menunjukkan

adanya gugus CO_3^{2-} . Spektra FTIR pada sampel cangkang bekicot setelah kalsinasi pada suhu 500 °C (Gambar 3.b) menunjukkan bahwa gugus fungsi O-H dapat dilihat pada bilangan gelombang 3649,98 cm^{-1} , 3736,36 cm^{-1} dan 3837,59 cm^{-1} . Bilangan gelombang 712,75 cm^{-1} dan 876,06 cm^{-1} merupakan gugus karbonat yang menunjukkan adanya *calcite*, hal ini serupa dengan penelitian Islam *et al* (2011) yang menyatakan puncak penyerapan *calcite* dari cangkang kerang darah berada pada bilangan gelombang 875 cm^{-1} . Selain itu gugus fungsi CO_3^{2-} juga berada pada bilangan gelombang 1440,6 cm^{-1} , hal ini dikarenakan gugus karbonat CO_3^{2-} dari sampel anorganik lainnya dapat diamati pada rentang 1490 cm^{-1} -1410 cm^{-1} (Coates, 2000). Sedangkan spektra FTIR pada suhu kalsinasi 800 °C (Gambar 3.c) menunjukkan adanya gugus O-H dari $\text{Ca}(\text{OH})_2$ yaitu pada bilangan gelombang 3838,28 cm^{-1} , 3736,10 cm^{-1} , 3677,19 cm^{-1} dan 3646,00 cm^{-1} . Selanjutnya bilangan gelombang 1489,31 cm^{-1} , 877,07 cm^{-1} dan 562,70 cm^{-1} merupakan gugus Ca-O. Hal ini berdasarkan pada penelitian Rujitanapanich *et al* (2014) yang menyatakan gugus Ca-O dari cangkang kerang tiram terdapat pada bilangan gelombang 874 cm^{-1} , selain itu gugus Ca-O dari cangkang kerang hijau juga ditemukan pada bilangan gelombang 1499,99 cm^{-1} (Hu *et al*, 2011).



Gambar 3. Spektra FTIR sampel bubuk cangkang bekicot (a) sebelum kalsinasi, (b) kalsinasi pada suhu 500 °C, dan (c) kalsinasi pada suhu 800 °C.

4 KESIMPULAN

Pembuatan bubuk kalsium karbonat dengan memanfaatkan limbah biomaterial dengan perlakuan awal pencucian dengan larutan 5 % H_2SO_4 dan dilanjutkan dengan kalsinasi telah berhasil didemonstrasikan. Dekomposisi kalsium karbonat cangkang bekicot menjadi kalsium oksida terjadi pada suhu 743 °C melalui reaksi endotermik seperti yang ditunjukkan pada hasil analisis termal. Hasil analisis sinar-x menunjukkan fasa *aragonite* cangkang bekicot be-

revolusi menjadi fasa *calcite* pada suhu kalsinasi 500 °C dan pada suhu kalsinasi 800 °C terdekomposisi menjadi kalsium oksida. Gugus fungsi karbonat terdapat pada sampel baik sebelum maupun sesudah kalsinasi. Potensi kandungan kalsium oksida yang besar pada cangkang bekicot dapat dijadikan sebagai sumber kalsium alami yang relatif murah sehingga dapat digunakan sebagai bahan baku dalam pembuatan biokeramik.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih atas dukungan finansial dari Kementerian Riset, Teknologi dan Pendidikan Tinggi Indonesia melalui program hibah penelitian *Fundamental* tahun 2016.

REFERENSI

- [1] Birla, A., Bhaskar, S., Uphadyay, S.N., and Sharma, Y.C. 2012. Kinetics studies of synthesis of biodiesel from waste frying oil using a heterogeneous catalyst derived from snail shell. *Journal of Bioresource Technology*. Vol 106. pp. 95-100.
- [2] Coates, J. 2000. *Interpretation of Infrared Spectra, A Practical Approach, in Encyclopedia of Analytical Chemistry*. John Wiley & Sons Ltd. USA. pp. 10815-10837.
- [3] Cobbinah, J.R. 2008. *Snail Farming in West Africa: Production, Processing, and Marketing*. Technical Centre for Agricultural and Rural Cooperation. Page 10.
- [4] Dewi, S.P. 2010. *Perbedaan Efek Pemberian Lendir Bekicot (Achatina fulica) dan Gel Bioplacenta terhadap Penyembuhan Luka Bersih pada Tikus Putih*. Skripsi. Universitas Sebelas Maret. Surakarta. Hal 3.
- [5] Engmann, F.N., Newlove, A.A., Patricia, O.D., and Wilfred, S. 2013. Proximate and Mineral Composition of Snail (*Achatina achatina*) Meat; Any Nutritional Justification for Acclaimed Health Benefits?. *Journal of Basic and Applied Scientific Research*. Vol 3. No 4. pp. 8-15.
- [6] Fernianti, D. 2008. Cangkang Bekicot sebagai Bahan Baku Proses Pembentukan Kalsium Bikarbonat $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$. *Jurnal Teknik Kimia*. Vol 15. No 1. Hal. 1-4.
- [7] Hu, S., Wang, Y., and Han, H. 2011. Utilization of Waste Freshwater Mussel Shell as an Economic Catalyst for Biodiesel Production. *Journal of Biomass and Bioenergy*. Vol. 35. pp. 3627-3635.
- [8] Ireland, M.P., 1991. The Effect of Dietary Calcium on Growth, Shell Thickness and Tissue Calcium Distribution in The Snail *Achatina fulica*. *Journal Comparative Biochemistry Physiology*. Vol 98A. No 1. pp. 111-116.
- [9] Islam, Kh.N., Zuki, Md., Noordin, M.M., Zobir, M., Rahman, N.S.B.A., and Ali, Md.E. 2011. Characterisation of Calcium Carbonate and its Polymorphs from Cockle Shells (*Anadara granosa*). *Powder Technology*. Vol.213. pp. 188-191.
- [10] Kalio, G.A., Etela, I., Fredrick, I., and Ugwo, E.O. 2010. Pawpaw Leaves Supplemented with Three Calcium

- Sources And Their Effects On The African Giant Land Snail In Humid Nigeria. *Journal of Agriculture and Social Research (JASR)*. Vol 10. No. 1. pp. 43-47.
- [11] Lesbani, A., Palita, T., Risfidian, M., and Fahmariyanti. 2013. Preparation of Calcium Oxide from *Achatina fulica* as Catalyst for Production of Biodiesel from Waste Cooking Oil. *Indonesian Journal of Chemistry*. Vol 13. No 2. pp. 176-180.
- [12] Pracaya. 2008. *Hama dan Penyakit Tanaman*. Penebar Swadaya. Jakarta. Hal. 297-299.
- [13] Qoniah, I., dan Didik P. 2010. *Penggunaan Cangkang Bekicot Sebagai Katalis Untuk Reaksi Transesterifikasi Refined Palm Oil*. Skripsi. FMIPA. Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Surabaya.
- [14] Venette, R.C., dan Margaret, L. 2004. *Mini Risk Assessment Giant African Snail, Achatina fulica*. Department Entomology. University of Minnesota. pp. 1-30.
- [15] Raut, S. K., dan Barker, G. M. 2002. *Achatina fulica Bowdich and Other Achatinidae as Pests in Tropical Agriculture, in Mollusca as Crop Pests*. CAB International Publishing. Hamilton. New Zealand. pp. 1-60.
- [16] Rujitanapanich, S., Kumpapan, P., and Wanjanoi, P. 2014. Synthesis of Hydroxyapatite from Oyster Shell Via Precipitation. *Energy Procedia*. Vol. 56. pp. 112-117.
- [17] Sahara, E., Mik S., dan Erfi R. 2009. *Pemuliaan dan Teknologi Pengolahan Produk Ternak Itik dan Puyuh*. Paradigma Indonesia (Group Elmatara). Yogyakarta. Hal. 31.
- [18] Saputra, L., Noor R., Hapsari T.P., dan Sunardi. 2012. Produksi Biodiesel dari Minyak Jelantah dengan Cangkang Bekicot (*Achatina fulica*) sebagai Katalis Heterogen. *Jurnal Prestasi*. Vol 1. No 2. Hal. 118-125.
- [19] Umbreit, M.H., and Jedrasiewicz, A. 2000. Application of Infrared Spectrophotometry to the Identification of Inorganic Substances in Dosage Forms of Antacida Group. *Acta Poloniae Pharmaceutica*. Vol. 57. No. 2. pp. 83-91.



Pengaruh Kedalaman pada *Output Factor* Lapangan Kecil dengan Detektor *Thermoluminesense Dosimeter Rods* dan *Ionization Chamber Exradin A16*

LARAS ATI NUR FATIMAH¹⁾, ANDRIAN DEDE HANDIKA¹⁾, WAHYU EDY WIBOWO²⁾, DAN SUPRIYANTO ARDJO PAWIRO¹⁾

¹⁾Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Indonesia, Indonesia. ²⁾RSUPN Dr. Cipto Mangunkusumo, Jakarta, Indonesia

INTISARI: Radioterapi dengan teknik modern menjadi pilihan terapi radiasi yang lebih akurat dan presisi. Radioterapi modern dilakukan dengan lapangan kecil untuk membentuk lapangan radiasi yang konformal dengan bentuk target tumor pasien. Penggunaan lapangan kecil berhubungan dengan Treatment Planning System (TPS) yang menjamin delivery terapi radiasi tepat sesuai dengan dosis yang di preskripsikan oleh dokter. Lapangan kecil merupakan lapangan radiasi yang ukurannya lebih kecil dibandingkan range elektron lateralnya. Keadaan ini memungkinkan gangguan dosis, dimana dosis yang diterima detektor berbeda dengan dosis sebenarnya. Commissioning merupakan prosedur awal dalam menyediakan data pesawat yang digunakan pada perhitungan TPS. Tahap penting dari proses tersebut adalah pengukuran output factor. Output factor penting untuk penentuan ketepatan perhitungan dosis TPS. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui output factor berkas lapangan kecil dengan thermoluminesense dosimeter LiF dan mikrochamber Exradin A16. Lapangan radiasi yang digunakan adalah 10x10 cm²; 4x4 cm²; 2.4x2.4 cm²; dan 0.8x0.8 cm² dengan solid water phantom berukuran 30x30cm². Perbandingan dilakukan dengan perhitungan TPS Pinnacle³. Hasil penelitian menunjukkan semakin kecil lapangan, maka nilai bacaan yang terukur akan semakin rendah. Selain itu hasil kurva output faktor berdasarkan pengukuran dengan menggunakan Exradin A16 memiliki deskripsi yang lebih kecil dibandingkan dengan TLD. Hal tersebut ditunjukkan dengan kedekatan nilai pengukuran dengan nilai perhitungan TPS.

KATA KUNCI: *output factor*; radioterapi; lapangan kecil; thermoluminesense dosimeter; *ionization chamber*

ABSTRACT: Radiotherapy with modern technique is a new choice of accurate and precision radiation therapy. Modern radiotherapy done with the used of small field to shape the field that conform with the volume target. The use of small field related with the treatment planning system (TPS) that assure the treatment delivery correspond with the prescribe dose. Small field is a field with a size less than the lateral range of their charge particles. This condition enable to produce a perturbation of the dose. Commissioning is early procedure to provide machine data to calculate the dose in TPS. The important step is output factor measurement. Output factor important to make sure TPS calculate accurate. This research shows output factor measurement with thermoluminesense dosimeter (TLD) LiF an ionization chamber Exradin A16. Radiation field size was 10x10 cm²; 4x4 cm²; 2.4x2.4 cm²; and 0.8x0.8 cm² was used with the solid water phantom measurement. The result then compared with the calculation of TPS Pinnacle³. The result shows, the decrease of field size, the decreased of the dose output. The output factor measurement with Exradin A16 shows lower discrepancies than the TLD measurement. The result compared with the extrapolation data of the TPS.

KEYWORDS: output factor, small field, radiotherapy, Exradin A16, Thermoluminesense Dosimeter

E-MAIL: ¹⁾fatimalarasati06@gmail.com, ²⁾wahyu.bovie@gmail.com

1 PENDAHULUAN

Radioterapi merupakan terapi kanker dengan menggunakan radiasi, baik foton, elektron maupun partikel lain. Di Indonesia sendiri, terapi kanker dengan terapi radiasi telah lama dilakukan. Beberapa teknik radiasi modern seperti *Intensity Modulated Radiation Therapy* (IMRT), *Stereotactic Body Radiation Therapy* (SBRT), dan *Stereotactic Radiosurgery* (SRS) memungkinkan pemberian radiasi yang lebih konform dengan bentuk target tumor pasien. Optimisasi tersebut dilakukan dengan menggunakan lapangan yang kecil di dalam lapangan yang sering dikenal dengan *segment*. Penggunaan

lapangan kecil akan menjamin *delivery* radiasi pada pasien lebih akurat dan presisi pada target tumor pasien dengan radiasi yang mengenai jaringan sehat lebih kecil dibandingkan menggunakan teknik konvensional. Pada radioterapi kanker, *commissioning* sangat penting untuk menyediakan data pesawat yang terkoneksi dengan *Treatment Planning System* (TPS). Salah satu prosedur *commissioning* tersebut adalah pengukuran faktor keluaran (*output factor*) pesawat radiasi. *Output factor* (OF) penting dalam menentukan ketepatan perhitungan dosis TPS. Ketepatan pengukuran OF akan berpengaruh pada hasil perhitungan dosis pada TPS. Penurunan output faktor akan menyebabkan dosis terukur

lebih tinggi dibandingkan dosis terkalkulasi pada TPS dan seba-liknya (Azimi *et al.*, 2012). Oleh karena itu, pengukuran output faktor akan sangat penting dengan digunakannya teknik modern yang melibatkan penggunaan lapangan kecil khususnya $<4 \times 4$ cm².

Pengukuran OF lapangan kecil harus memper-timbangkan ukuran detektor yang digunakan saat pengukuran. Ukuran detektor harus cukup kecil dibandingkan ukuran lapangan radiasi. Dalam hal ini, *Termoluminesense Dosimeter* (TLD) dan *ionization chamber* sering kali menjadi pilihan pada peng-ukuran OF pesawat radiasi. *Termoluminesense Dosi-meter* (TLD) merupakan dosimeter yang sering digu-nakan pada pengukuran dosis radiasi. TLD umum-nya berbetuk chip atau rods. TLD sendiri memiliki rentang dosis lebar yaitu 10 pGy – 10 Gy. Dengan alasan tersebut, TLD tetap menjadi pilihan pada pengukuran output faktor pesawat di samping ukurannya yang kecil cocok untuk pengukuran lapangan kecil. Exradin A16 merupakan jenis detek-tor *ionization chamber* yang memiliki volume efektif sangat kecil yaitu 0.007 cm³. Dengan ukuran volu-me efektif yang kecil tersebut, detektor ini diharap-kan mampu menghasilkan hasil pengukuran output faktor lapangan kecil dengan baik.

Beberapa penelitian yang telah ada, mengemu-kakan bahwa semakin kecil ukuran lapangan radiasi, maka akan menyebabkan penurunan pada nilai output faktor. Beberapa penelitian yang telah dilakukan antara lain dilakukan dengan menggu-nakan TLD jenis chip yang memiliki dimensi 1×1 mm, *ionisation chamber* yang ukurannya tidak cukup kecil dibandingkan ukuran lapangan radiasi. Pada penelitian ini dilakukan penelitian untuk mengetahui pengaruh letak kedalaman detektor di dalam fantom terhadap output faktor yang terukur.

2 KAJIAN LITERATUR DAN PEGEMBANGAN HIPOTESIS

Radioterapi modern dengan lapangan nonstandar kini mulai banyak digunakan seiring dengan meningkatnya penggunaan teknik *Intensity Modulated Radiation Therapy* (IMRT), *Stereotactic Body Radiation Therapy* (SBRT) dan *Stereotactic Radio-surgery* (SRS). Teknik tersebut semakin berkembang dengan perkembangan teknologi pesawat yang semakin modern. Penggunaan lapangan konvensional ku-rang dapat mengimplementasikan pendekatan *treat-ment* pada tumor yang berukuran iregular. Terlebih lagi dengan penggunaan *Multileaves Collimator* (MLC) yang menambah kompleks dosimetri pada target volume. Penggunaan lapa-ngan nonstandar

dan lapangan kecil kerap kali dipilih dengan mem-perhitungkan efek konformalitas bentuk target yang akan di radiasi. Beberapa pesawat menyediakan teknologi lapangan radiasi yang kontras dengan lapangan radiasi konvensional. Pengukuran output faktor pesawat akan menjamin TPS memiliki data pesawat yang akurat, sehingga perhitungan dosis pasien akan lebih tepat dan presisi.

Lapangan kecil (*small field*) adalah lapangan dengan ukuran yang lebih kecil dibandingkan dengan range lateral dari partikel bermuatannya. Beberapa penelitian merumuskan lapangan yang termasuk lapangan kecil adalah lapangan dengan ukuran $<4 \times 4$ cm² (Das *et al.* 2007; Spang *et al.* 2011). Lapangan tersebut mencakup permasalahan lapangan nonstandar dengan tidak tercapainya kesetimbangan elektronik (*electronic disequilibrium*).

Charged Particle Disequilibrium

Hal penting dalam dosimetri radiasi lapangan kecil adalah keadaan kesetimbangan partikel bermuatan (*charged particle equilibrium*) dalam medium. Kese-timbangan partikel bermuatan, hal tersebut terjadi ketika jumlah partikel yang menembus suatu volume dengan partikel yang meninggalkan volume tersebut memiliki energi yang sama. Keadaan tersebut tidak dapat terpenuhi pada *treatment* radiasi dengan menggunakan lapangan kecil. Pada *treatment* dengan menggunakan lapangan kecil terjadi *lateral electronic disequilibrium*. Keadaan ini terjadi dikarenakan ukuran lapangan yang lebih kecil dibandingkan dengan range elektron sisi lateral (Spang, 2011).

Volume Averaging

Volume averaging terjadi ketika dimensi detektor lebih besar daripada lapangan radiasi. Oleh karena itu bacaan detektor merupakan rerata dari keselu-ruhan volume sensitif dari bagian yang terkena ra-diasi. Berdasarkan penjelasan tersebut, *ionization chamber* akan mengalami penurunan resolusi spa-sial ketika lapangan radiasi mendekati atau lebih kecil dibanding ukuran *ionization chamber*.

Penelitian Haryanto dkk mengemukakan bahwa terjadi penurunan output faktor dengan penurunan ukuran lapangan. Pengukuran output faktor dengan menggunakan *ionization chamber* memiliki output faktor yang lebih rendah dibandingkan pengukuran dengan menggunakan detektor diode, diamond, dan *pinpoint chamber*. Pengukuran output faktor pada lapangan kecil sebaiknya dilakukan dengan detektor yang ukurannya cukup kecil dibandingkan dengan ukuran lapangan. Hal tersebut dilakukan

untuk mengurangi efek volume averaging yang akan mempengaruhi hasil bacaan detektor. Oleh karena itu, sebaiknya digunakan ukuran detektor yang cukup kecil dibandingkan ukuran lapangan sehingga mengurangi permasalahan yang kerap kali dialami pada pengukuran di lapangan kecil.

3 METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan di RSUPN Cipto Mangunkusumo, Jakarta. Pengukuran dilakukan dengan detektor *Thermoluminescence Dosimeter* (TLD) LiF jenis rods dengan dimensi 1x6 mm. Selain TLD, digunakan juga ionization chamber jenis Exradin A16 dengan volume efektif 0,007 cm³. Pengukuran dilakukan pada pesawat *linear accelerator* Elekta Synergy S dengan energy 6 MV, dengan MU 200 dan dengan menggunakan *solid water phantom* berukuran 30x30x1 cm³ sebanyak 15 buah. Solid water phantom ini terbuat dari *Polymethyl methacrylate* (PMMA) atau yang sering dikenal dengan akrilik dengan densitas 1,045 g/cm³.

Pengukuran dilakukan dengan posisi detektor berada pada kedalaman 5 cm dan 10 cm dengan SSD 100 cm pada lapangan 10x10 cm², 4x4 cm², 2.4x2.4 cm² dan 0.8x0.8cm². Pembacaan TLD dilakukan dengan menggunakan TLD Reader Harshaw 3500. Pengukuran dengan Exradin A16 dilakukan dengan pembacaan elektrometer MAX 4000 pada tegangan kerja 300 V. Untuk memperoleh data OF hasil ekstrapolasi TPS, sebelumnya dilakukan *scanning* fantom dengan menggunakan CT Simulator. Citra hasil *scanning* kemudian dikirim ke TPS untuk dilakukan *planning* dengan keadaan yang sama dengan pengukuran. Data OF berdasarkan perhitungan TPS Pinnacle³ didapat dengan melakukan perbandingan dosis pada lapangan tertentu dengan dosis pada lapangan referensi 10x10 cm pada kedalaman yang sama yang didapat dari perhitungan TPS. Hasil perhitungan TPS merupakan hasil ekstrapolasi dikarenakan, TPS hanya memiliki nilai OF minimum pada lapangan 4x4 cm².

4 HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, dipaparkan pada kurva dibawah ini. Terjadi penurunan output faktor dengan penurunan ukuran lapangan. Penurunan drastis terlihat pada lapangan 2,4x2,4 cm dan 0,8x0,8 cm dengan posisi detektor berada pada kedalaman 5 cm. Hal tersebut juga terjadi pada pengukuran pada posisi detektor berada pada kedalaman 10 cm. Pada gambar 4 juga dipaparkan bahwa posisi kedalaman detektor tidak mempengaruhi faktor keluaran pesawat. Hal tersebut

sejalan dengan prinsip output faktor yang mana merupakan perbandingan keluaran pesawat pada lapangan tertentu dengan keluaran pesawat pada lapangan referensi yang pada penelitian ini adalah 10x10 cm. Hasil penelitian ini juga sejalan dengan beberapa penelitian yang dilakukan dengan prinsip yang sama dengan detektor yang berlainan.

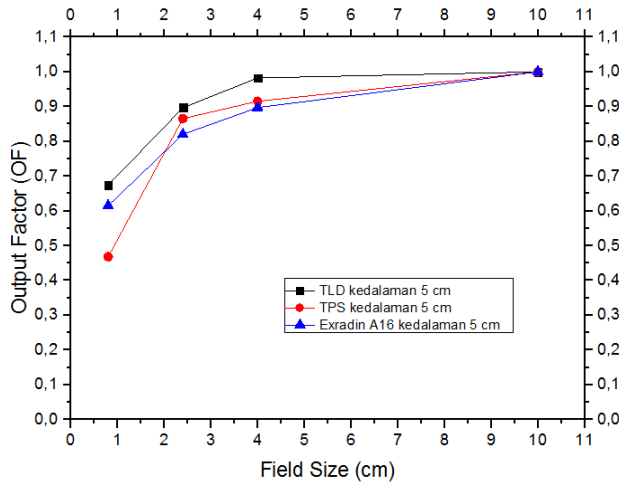


Gambar 1. Posisi solid water fantom pada saat pengambilan data.

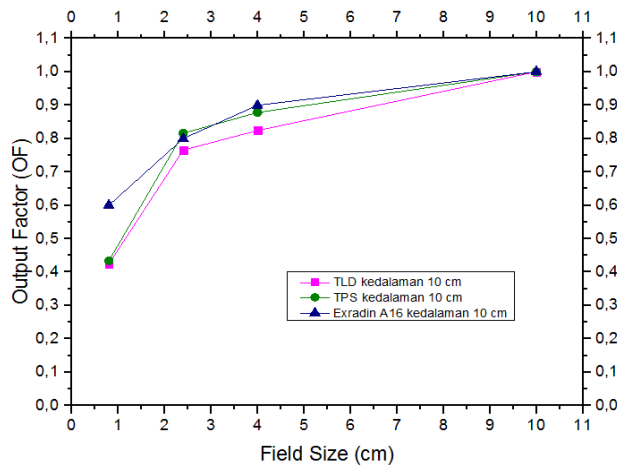
Deviasi yang dihasilkan, dipengaruhi oleh efek *volume averaging* dan *lateral electronic equilibrium* yang menjadi permasalahan pada lapangan kecil. dengan ukuran detektor yang cukup kecil seperti TLD dan *ionization chamber* Exradin A16, efek *lateral electronic disequilibrium* tetap terjadi, meskipun efek *volume averaging* sedikit dapat tereduksi dengan penggunaan detektor yang memiliki ukuran cukup kecil dibandingkan ukuran lapangan.

Output factor berdasarkan hasil perhitungan TPS tidak jauh berbeda dengan hasil pengukuran. Hal tersebut menunjukkan, bahwa perhitungan TPS dengan data pengukuran masih dalam rentang yang kecil terbukti dengan kurva yang masih berada pada deviasi yang kecil dengan pola yang sama. Pengukuran pada kedalaman 5 cm dengan menggunakan TLD menunjukkan hasil output faktor yang lebih tinggi dibandingkan dengan pengukuran Exradin A16.

Pengukuran pada kedalaman 10 cm menunjukkan hasil yang lebih tinggi dengan detektor Exradin A16 dibandingkan dengan detektor TLD. Pada gambar 4 terlihat hasil pengukuran memiliki pola yang sama dengan beberapa referensi jurnal. Berdasarkan gambar 4 juga terlihat bahwa hasil ekstrapolasi perhitungan TPS masih berada pada rentang yang normal di dalam kurva pengukuran maupun kurva berdasarkan referensi jurnal.



Gambar 2. Output Factor pesawat pada kedalaman 5 cm.

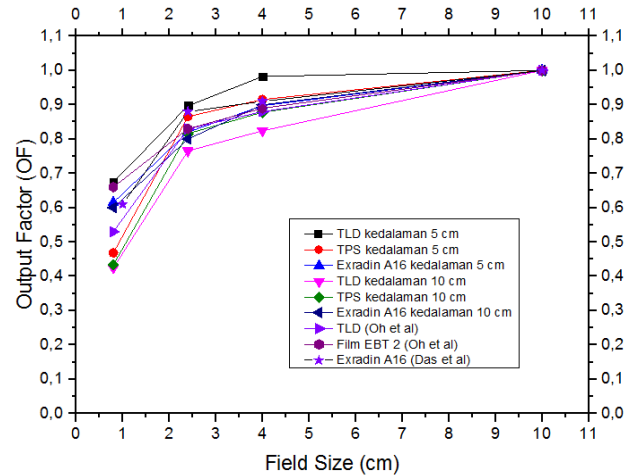


Gambar 3. Output Factor pesawat pada kedalaman 10 cm.

5 SIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, penurunan ukuran lapangan akan menyebabkan penurunan nilai faktor keluaran pesawat. Posisi letak kedalaman detektor tidak berpengaruh signifikan terhadap faktor keluaran pesawat. Hal tersebut terlihat pada kurva faktor keluaran pesawat yang tidak jauh berbeda antara posisi detektor berada

pada kedalaman 5 cm dan 10 cm. Pada penelitian ini diperoleh juga hasil perhitungan TPS berdasarkan ekstrapolasi dari lapangan minimal 4x4 cm² TPS yang menunjukkan hasil keluaran pesawat yang dekat dengan pengukuran, yaitu berada pada rentang hasil pengukuran dan referensi beberapa penelitian sebelumnya.



Gambar 4. Perbandingan output factor pada kedalaman 5 cm dan 10 cm. (Das et al.,2007) (Oh et al.,2014)

REFERENSI

- [1] Azimi, R., Alaei, P., Higgins, P., & Alto, P. (2012). The effect of small field output factor measurements on IMRT dosimetry. *Medical Physics*, 55455(8), 4691–4694. <http://doi.org/10.1118/1.4736527>
- [2] Benmakhlof, H., Sempau, J., & Andreo, P. (2014). Output correction factors for nine small field detectors in 6 MV radiation therapy photon beams: a PENELOPE Monte Carlo study. *Medical Physics*, 41(4), 041711. <http://doi.org/10.1118/1.4868695>
- [3] Cranmer-Sargison, G., Weston, S., Sidhu, N. P., & Thwaites, D. I. (2011). Experimental small field 6 MV output ratio analysis for various diode detector and accelerator combinations. *Radiotherapy and Oncology*, 100(3), 429–435. <http://doi.org/10.1016/j.radonc.2011.09.002>
- [4] Das, I. J., Ding, G. X., & Ahnesjö, A. (2008). Small fields: nonequilibrium radiation dosimetry. *Medical Physics*, 35(1), 206–215. <http://doi.org/10.1118/1.2815356>
- [5] Haryanto, F., Fippel, M., Laub, W., Dohm, O., & Nüsslin, F. (2002). Investigation of photon beam output factors for conformal radiation therapy--Monte Carlo simulations and measurements. *Physics in Medicine and Biology*, 47(11), N133–N143.
- [6] Laub, W. U., & Wong, T. (2003). The volume effect of detectors in the dosimetry of small fields used in IMRT.

- Medical Physics, 30(3), 341–347.
<http://doi.org/10.1118/1.1544678>
- [7] Oh, S. A., Yea, J. W., Lee, R., Park, H. B., & Kim, S. K. (2014). Dosimetric Verifications of the Output Factors in the Small Field Less Than 3 cm² Using the Gafchromic EBT2 Films and the Various Detectors, 25(4), 218–224.
- [8] Pantelis, E., Moutsatsos, a., Zourari, K., Petrokokkinos, L., Sakelliou, L., Kilby, W., ... Seimenis, I. (2012). On the output factor measurements of the CyberKnife iris collimator small fields: Experimental determination of the $k_{clinMSR}$ correction factors for microchamber and diode detectors. *Medical Physics*, 39(8), 4875–4885.
<http://doi.org/10.1118/1.4736810>
- [9] Tanny, S., Sperling, N., & Parsai, E. I. (2015). Correction factor measurements for multiple detectors used in small field dosimetry on the Varian Edge radiosurgery system. *Medical Physics*, 42(9), 5370.
<http://doi.org/10.1118/1.4928602>
- [10] Wuerfel, J. U. (2013). Dose measurements in small fields. *Medical Physics International*, 1(1), 81–90.



Deteksi Magnesium dalam Tanah Terdampak Tsunami dengan Teknik Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) Menggunakan Laser Nd-YAG

NASRULLAH IDRIS¹, KURNIA LAHNA¹, DAN MULIADI RAMLI²

¹Jurusan Fisika, ²Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Syiah Kuala, Aceh, Indonesia

INTISARI: Potensi teknik spektroskopi plasma laser (laser induced breakdown spectroscopy, LIBS) sebagai teknik inspeksi cepat kandungan garam Mg dalam tanah yang terdampak tsunami telah dilakukan. Perangkat teknik LIBS yang digunakan dalam studi ini terdiri dari sebuah laser Nd-YAG, lensa pemfokus berkas laser dan sebuah sistem analiser kanal banyak, optical multichannel analyzer (sistem OMA). Sampel tanah telah diambil dari daerah kawasan pantai Aceh yang terdampak tsunami 2004. Sebagai perbandingan, sampel tanah juga telah diambil dari daerah yang tidak terkena dampak tsunami. Sampel tanah tersebut telah dibuat dalam bentuk pelet. Untuk membangkitkan plasma, berkas laser difokuskan pada permukaan pelet tanah menggunakan lensa. Spektrum emisi plasma tersebut dideteksi dengan menggunakan sistem OMA. Berdasarkan spektrum emisi yang dideteksi, ditemukan bahwa garis-garis spektral Mg dapat dideteksi dengan jelas pada jangkauan 200 nm-300 nm dan 370 nm- 382 nm baik dari sampel tanah yang ber dampak tsunami maupun yang tidak ber dampak tsunami. Ditemukan juga bahwa intensitas garis emisi Mg yang dideteksi dari kedua jenis sampel, tanah yang terdampak tsunami dan tidak terdampak tsunami berbeda secara signifikan, yang menyiratkan bahwa tanah yang terdampak tsunami mengalami polusi garam. Pada sisi lain, hasil ini memperlihatkan potensi teknik LIBS sebagai alat inspeksi cepat kandungan Mg dalam tanah.

KATA KUNCI: Teknik LIBS, Garam, Magnesium, Tanah terdampak tsunami, Tsunami Samudera India 2004

ABSTRACT: The potency of laser induced breakdown spectroscopy (LIBS) technique as fast inspection tool for checking Mg content in tsunami-impacted soil has been tested. Apparatus of LIBS technique used in this work consists of a Nd-YAG laser, a focusing lens, and an optical multichannel analyzer (OMA) system. Soil sample was collected from the coastal region in Banda Aceh city, Aceh, Indonesia impacted severely by the giant Indian Ocean 2004. As a comparison, soil samples were also taken from the tsunami un-impacted region in Banda Aceh city. The soil samples were made in the form of pellet. For generating luminous plasma, the Nd-YAG laser was focused onto the surface of the pellets using the focusing lens. Emission spectra from the produced plasma were detected using OMA system. As the results, it was found that emission spectral lines of Mg can be detected clearly at ranges of 200 nm-300 nm and 370 nm- 382 nm from both samples, tsunami impacted soil and tsunami impacted soil. It was also found that emission intensity of Mg spectral lines from two samples, tsunami impacted and un-impacted soil are significantly different, namely the emission intensity of Mg lines are far higher in tsunami impacted soil as compared to the tsunami un-impacted soil, implying that the tsunami impacted soil has been polluted by salt. On the other this results revealed the potential use of the LIBS technique as fast inspection tool of Mg content in soil.

KEYWORDS: LIBS, Salt, Magnesium, Tsunami impacted soil, Indian Ocean tsunami 2004

E-MAIL: nasrullah.idris@unsyiah.ac.id, kurnialahna@unsyiah.ac.id, muliadiramli@unsyiah.ac.id

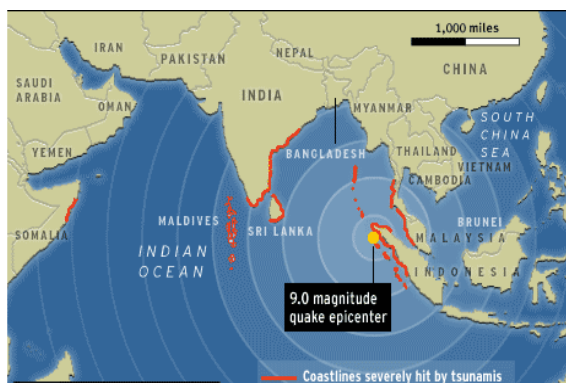
1 PENDAHULUAN

Selain sangat mempengaruhi produktifitas lahan pertanian^[1-2], kandungan garam dalam tanah juga menjadi salah satu pemicu proses korosi bangunan^[3-5]. Karenanya, analisa polusi garam dalam tanah penting dilakukan. Pada saat tsunami besar terjadi, sedimen tsunami dan air laut dibawa ke daratan yang melingkupi area yang sangat luas. Daerah yang dilanda tsunami tersebut kemudian akan mengalami polusi garam dan kimia lainnya akibat sedimen dan air laut tersebut. Kejadian gempa bumi besar yang sangat kuat intensitasnya yang berpusat di Samudera India pada tanggal 26 Desember 2004 atau sering disebut juga sebagai gempa Aceh, telah menyebabkan tsunami raksasa, yang juga dikenal sebagai tsunami Aceh, membawa sedimen, air laut,

dan bahan-bahan lain dari lautan dalam jumlah yang sangat besar ke daratan sehingga menyebabkan kerusakan lingkungan yang sangat parah dan luas, yang melanda berbagai negara di dunia seperti diilustrasikan dalam Gambar 1.

Berdasarkan penelitian yang dilakukan setelah bencana tsunami raksasa Aceh 2004 tersebut ditemukan bahwa kandungan logam berat seperti Cd, Cu, Zn, Pb, Hg dan As dan garam seperti Na⁺, K⁺, Ca⁺², Mg⁺², Cl and SO₄⁻² dalam sampel-sampel tanah yang diambil dari kawasan pantai yang terkena dampak tsunami tersebut di Thailand^[6-8] sangat tinggi. Kandungan logam berat dan garam dalam tanah terkena dampak tsunami ini (*tsunami un-impacted*) masih sangat tinggi meskipun setelah 1.5 tahun dan 3.5 tahun kejadian tsunami Aceh terse-

but^[9]. Beberapa pulau yang terkena dampak parah tsunami mungkin tidak dapat didiami lagi^[10]. Bahkan hal ini diperkirakan akan berlangsung berpuluh-puluh tahun^[11].



Gambar 1 ilustrasi luasnya dampak tsunami akibat gempa bumi besar tanggal 26 Desember 2004 yang berpusat di Samudera India (sumber: MNSBC, an American basic cable and satellite television network).

Oleh karena itu perlu dilakukan monitoring secara periodik kontaminasi garam dalam tanah di kawasan pantai yang pernah dilanda tsunami. Selama ini teknik analitik yang digunakan untuk analisa kandungan dalam tanah yang pernah dilanda tsunami tersebut adalah teknik kimia basah^[6-7], teknik *Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy*, *X-Ray Diffraction (XRD)* dan *atomic absorption spectroscopy (AAS)*^[8]. Pada dasarnya teknik-teknik analitik ini tidak praktis karena memerlukan perlakuan awal sampel yang rumit dan melelahkan, padahal jumlah sampel yang harus dianalisa sangat banyak mengingat kawasan yang dilanda tsunami biasanya sangat luas. Hal ini menyebabkan teknik-teknik tersebut tidak memungkinkan untuk melakukan inspeksi cepat kontaminasi garam dalam tanah yang terkena tsunami yang demikian besar luasnya. Oleh karena itu perlu dikembangkan sebuah teknik analitik baru yang dapat digunakan untuk inspeksi cepat kontaminasi garam dalam tanah.

Salah satu kandidat teknik analitik untuk tujuan di atas adalah teknik spektroskopi plasma laser (*laser-induced breakdown spectroscopy*, LIBS). LIBS adalah sebuah teknik analitik yang berbasis pada penggunaan berkas laser untuk pembangkitan plasma dari sampel dan emisi optis dari plasma tersebut digunakan untuk analisa kualitatif dan kuantitatif. Sekarang, teknik LIBS menarik perhatian yang sangat kuat dari para peneliti sehingga menjadikan LIBS sebagai berkembang pesat dan diperkirakan akan menjadi bintang masa depan teknik analitik^[12]. Karena teknik LIBS ini telah berhasil digunakan pada berbagai sampel dalam berbagai fase^[13-14] termasuk tanah^[15], teknik ini berpotensi untuk dipakai se-

bagai alat analisa kontaminasi garam dalam tanah dilanda tsunami. Dalam penelitian pendahuluan sebelumnya teknik LIBS telah dipakai untuk mendeteksi dan mengidentifikasi garis-garis emisi spektral garam dalam tanah yang tidak terdampak tsunami. karena garam dalam tanah cukup banyak, yaitu B, Ca, Cl, K, Mg, dan Na, dimana masing-masing garam memiliki begitu banyak garis emisi spektral^[16], pada tahap pertama penelitian-penelitian tersebut difokuskan pada garam magnesium, Mg^[17-19]. Dalam studi tersebut ditemukan bahwa garis-garis emisi spektral Mg dapat dideteksi dengan jelas pada salah satu jangkauan panjang gelombang cahaya tampak, yaitu 372 -384 nm, yaitu Mg I 382.94 nm, Mg I 383.23 nm dan Mg I 383.83 nm. Namun garis-garis ini tidak cocok untuk dijadikan garis analitik, karena garis-garis emisinya tidak terisolasi dengan baik^[17]. Garis-garis emisi spektral juga dapat dideteksi dengan jelas dan kuat pada jangkauan panjang gelombang mulai 200 nm-300 nm dengan celah panjang gelombang pengukuran (*window*) berpusat pada panjang gelombang 280 nm^[18]. Dalam studi tersebut juga ditemukan bahwa *window* yang berpusat pada panjang gelombang 280 nm adalah *window* terbaik untuk pendeteksian garis-garis emisi spektral atomik (Mg I) dan ionik (Mg II) dimana ada 3 garis emisi spektral atomik dan ionik, yaitu Mg II 279.55 nm, Mg II 280.27 nm, dan Mg I 285.21 nm. Meskipun garis-garis ini menunjukkan intensitas emisi paling tinggi, namun garis-garis ini bukan kandidat garis analitik yang baik karena garis-garis ini adalah garis resonansi. Dengan mempertimbangkan rasio intensitas emisi terhadap emisi latar (S/B), dan juga lebar garis (FWHM), maka disimpulkan bahwa garis emisi spektral Mg I 277.67 nm dan Mg I 278.30 nm pada jangkauan panjang gelombang ultraungu, UV adalah garis-garis analitik yang baik^[18]. Oleh karena itu kedua garis ini dapat digunakan untuk deteksi dan analisa Mg dalam tanah yang terkena dampak tsunami menggunakan teknik spektroskopi plasma laser, LIBS.

2 METODE PENELITIAN

Peralatan dan susunan peralatan LIBS yang digunakan dalam penelitian ini pada dasarnya sama seperti yang digunakan dalam penelitian-penelitian awal sebelumnya^[17-18]. Perangkat sistem LIBS yang digunakan terdiri sumber laser, yaitu sebuah laser neodymium yttrium aluminum garnet, Nd-YAG (Quanta Ray; LAB SERIES; $\lambda=1,064$ nm; 500 mJ, 8 ns, 10 Hz) sebagai sumber untuk eksitasi plasma, sebuah lensa pemfokus berkas laser ($f=+150$ mm), dan sebuah detektor optik (sebuah sistem analyzer banyak kanal (*optical multichannel analyzer*, OMA system) yang terdiri dari sebuah spektrograf (McPherson

model 2061; panjang fokus 1,000 mm; konfigurasi f/8.6 Czerny-Turner) dan sebuah piranti terkopel muatan yang diperkuat (*intensified charge coupled device*, ICCD) dengan jumlah piksel 1024 x 256 (Andor I*Star), dan luas penampang 26-mm kuadrat (960 x 256 piksel aktif). Besarnya energi berkas laser dapat diatur secara bertahap. Pada tahap pertama energi berkas laser dikurangi menggunakan seperangkat filter. Selanjutnya energi berkas diatur dengan mengontrol tegangan masukan dioda laser pemompa kristal Nd-YAG sehingga energi dapat diatur dalam jangkauan 0-500 mJ tiap pulsa. Dalam penelitian ini energi berkas laser dibuat tetap sebesar 40 mJ selama pengambilan data spektral.

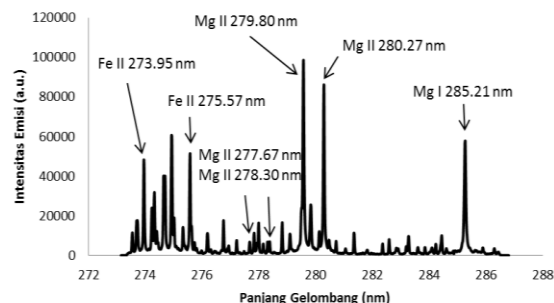
Sampel tanah yang digunakan dalam studi ini diambil dari kawasan pantai di daerah pantai kota Banda Aceh yang terkena dampak tsunami. Sampel diambil pada 3 titik/lokasi yang berbeda, yaitu 2 (dua) titik di Gampong Lamgugop dan 1 (satu) titik di Gampong Tibang, Kecamatan Syiah Kuala, Kota Banda Aceh, Aceh, Indonesia. Sebagai pembandingan, sampel tanah juga diambil dari kawasan tidak terkena tsunami di daerah kabupaten Aceh Besar. Semua sampel tanah yang diambil tersebut kemudian dikeringkan. Selanjutnya sampel tanah tersebut dibersihkan dari daun-daun dan akar-akar tanaman sedemikian rupa sehingga sampel tanah tersebut bersih dari akar atau daun-daunan. Sampel tanah yang telah kering dan bersih ini kemudian dibuat dalam bentuk pelet dengan diameter 15 mm dan ketebalan 3 mm dengan penekanan menggunakan mesin. Pelet tanah tersebut ditempatkan dalam bilik sampel pada tempat sampel. Gas penyangga/lingkungan dalam bilik selama pengukuran adalah udara pada tekanan 1 atmosfer yang merupakan kondisi tipikal yang diadopsi dalam teknik spektroskopi plasma laser ini.

Untuk pembangkitan plasma, berkas laser Nd-YAG tersebut difokuskan pada permukaan pelet dalam bilik sampel tersebut menggunakan lensa pemfokus. Emisi plasma tersebut kemudian diukur dengan sistem OMA sehingga diperoleh data garis-garis emisi spektral dan intensitas emisi. Data garis emisi spektral tersebut diamati guna mengetahui dan menganalisa garis-garis emisi spektral garam, Mg. Pengukuran dilakukan pada celah panjang gelombang pengukuran yang berpusat di panjang gelombang 280 nm.

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

Gambar 2 memperlihatkan spektrum emisi yang dideteksi dari sampel tanah yang terkena dampak tsunami. Spektrum emisi ini dideteksi pada panjang gelombang tengah 280 nm. Sampel yang dianalisa

adalah sampel yang diambil dari lokasi 1, yaitu Gampong Lamgugop, Kecamatan Syiah Kuala, Banda Aceh, salah satu daerah yang sangat parah terkena tsunami. Dapat dilihat dengan jelas bahwa garis-garis emisi Mg muncul dalam spektrum tersebut. Garis-garis emisi Mg tersebut sesuai seperti yang ada dalam basis data referensi^[16-17].

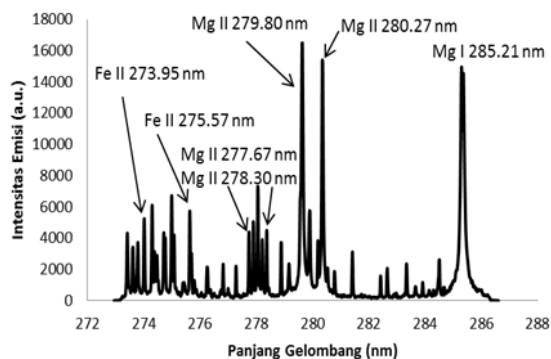


Gambar 2 Spektrum emisi yang dideteksi dari plasma setelah iradiasi berkas laser Nd-YAG yang difokuskan pada permukaan sampel tanah yang telah dibuat dalam bentuk pelet. Sampel tanah tersebut diambil pada lokasi/ titik 1 (Gampong Lamgugop, perbatasan dengan Gampong Peurada, Kecamatan Syiah Kuala Banda Aceh) daerah yang terkena tsunami. Spektrum emisi ini dideteksi pada celah panjang gelombang (*window*) yang berpusat di panjang gelombang 280 nm. Plasma dibangkitkan dengan energy berkas laser sebesar 40 mJ dalam lingkungan gas penyangga udara pada tekanan 1 atm.

Garis-garis emisi spektral Mg yang muncul tersebut adalah garis emisi atomik (Mg I 273.35 nm, Mg I 273.65 nm, Mg I 277.67 nm, Mg I 277.83 nm, Mg I 277.98 nm, Mg I 278.14 nm, Mg I 278.30 nm, Mg I 285.17 nm, dan Mg I 285.21 nm) dan garis emisi ionik (Mg II 273.35 nm, Mg II 273.65 nm, Mg II 279.55 nm, Mg II 279.80 nm, Mg II 280.27 nm). Karena banyak sekali garis Mg yang muncul pada jangkauan panjang gelombang ini, maka hanya beberapa garis saja yang ditulis dalam Gambar 2, yaitu Mg II 277.67 nm, 278.30 nm, Mg II 279.80 nm, Mg II 280.27 nm dan Mg I 285.21 nm. Terlihat bahwa intensitas garis emisi Mg sangat kuat, terutama garis-garis Mg II 279.80 nm, Mg II 280.27 nm, dan Mg I 285.21 nm.

Hasil yang serupa dengan untuk sampel tanah dari lokasi 1 tersebut juga diamati dari sampel-sampel tanah yang diambil dari lokasi-lokasi lainnya. Gambar 3 memperlihatkan spektrum emisi Mg dari sampel tanah yang diambil di lokasi 2, yaitu di Gampong Lamgugop pada titik ke-2. Sementara Gambar 4 mempertunjukkan spektrum emisi sampel tanah yang diambil dari lokasi 3, Gampong Tibang. Secara umum dapat dilihat bahwa spektrum yang diperoleh hampir sama, garis-garis Mg I dan Mg II muncul dalam semua spektrum tersebut. Perbedaan yang dapat diamati dari spektrum-spektrum tersebut

adalah variasi intensitas garis-garis emisi dari satu lokasi dengan lokasi lainnya.

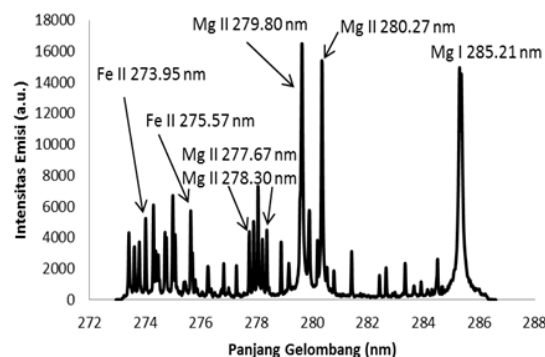


Gambar 3. Spektrum emisi yang dideteksi dari plasma setelah iradiasi berkas laser Nd-YAG yang difokuskan pada permukaan sampel tanah yang telah dibuat dalam bentuk pelet. Sampel tanah tersebut diambil pada lokasi/titik 2 (Gampong Lamgugop, Lorong Tunggal, Kecamatan Syiah Kuala Banda Aceh). Kondisi eksperimen pada saat pengambilan spektrum sama kondisi pengambilan spektrum dalam Gambar 2.

Memperhatikan Gambar 2, 3, dan 4, sebenarnya intensitas emisi garis-garis Mg II 277.67 nm dan Mg II 278.30 nm juga sangat kuat, namun karena perbedaan intensitas emisi garis-garis tersebut dengan garis-garis Mg II 279.80 nm, Mg II 280.27 nm, dan Mg I 285.21 nm sangat jauh, maka terlihat seolah-olah garis-garis ini memiliki intensitas yang tidak kuat. Padahal saat kita melihat secara lebih terperinci khususnya dengan memperbesar spektrum hanya untuk daerah Mg II 277.67 nm dan Mg II 278.30 nm maka terlihat bahwa kelima garis dalam kelompok tersebut sebenarnya memiliki intensitas yang tinggi. Seperti telah disimpulkan dalam studi terdahulu [20], dengan mempertimbangkan banyak hal, garis-garis ini adalah kandidat analit yang baik. Bersamaan dengan garis-garis emisi spektral Mg tersebut, ada beberapa garis emisi spektral Fe juga muncul, yaitu Fe II 273.95 nm dan Fe II 275.57 nm. Garis-garis emisi spektral tersebut dapat digunakan untuk normalisasi intensitas emisi garis-garis Mg.

Untuk melihat secara kualitatif kandungan garam Mg dalam tanah yang terdampak tsunami, intensitas emisi garis spektral Mg II 277.67 nm telah dibaca dan dinormalisasi dengan intensitas emisi garis spektral Fe II 273.95 nm, seperti ditunjukkan dalam Tabel 1. Fe diambil sebagai garis normalisasi karena kandungan Fe secara umum cukup tinggi, sehingga dapat dikatakan kandungan besi di dalam sampel-sampel tanah tersebut tidak akan jauh berbeda. Asumsi cukup beralasan karena ketiga lokasi pengambilan sampel masih berada dalam satu kecamatan yang sama. Intensitas emisi garis spektral Mg untuk sampel yang diambil dari 3 lokasi terse-

but. Pada dasarnya, intensitas emisi sebanding dengan konsentrasi Mg di dalam sampel, oleh karena itu hasil normalisasi secara kualitatif menyatakan konsentrasi Mg dalam sampel tanah yang diuji. Sebagai perbandingan, dalam tabel tersebut juga ditampilkan hasil dari sampel tanah yang tidak terdampak tsunami^[17, 20].



Gambar 4. Spektrum emisi yang dideteksi dari plasma setelah iradiasi berkas laser Nd-YAG yang difokuskan pada permukaan sampel tanah yang telah dibuat dalam bentuk pelet. Sampel tanah tersebut diambil pada lokasi/titik 3 (Gampong Tibang, Kecamatan Syiah Kuala Banda Aceh) di daerah yang terkena tsunami. Kondisi eksperimen pada saat pengambilan spektrum sama kondisi pengambilan spektrum dalam Gambar 2.

Tabel 1 Intensitas Emisi Mg II dari sampel tanah yang diambil dari beberapa lokasi di Kota Banda Aceh.

Sampel	Mg II 277.67	Fe II 273.95	Mg II 277.67/ Fe II 273.95
Lokasi 1	7000 nm	35000 nm	0.20 nm
Lokasi 2	4500 nm	8100 nm	0.55 nm
Lokasi 3	4300 nm	40000 nm	0.10 nm
Sampel Blank	2400 nm	7600 nm	0.32 nm

Terlihat dalam Tabel 1 bahwa sampel di lokasi 2 memiliki rasio Mg II 277.67 nm/ Fe II 273.95 nm paling tinggi dibandingkan dengan yang untuk lokasi 1 dan 3 dan pembandingnya, sampel blank, tanah yang tidak terkena dampak tsunami. Hal ini menyiratkan bahwa kandungan garam dalam tanah pada lokasi ini sangat tinggi. Berdasarkan observasi fisik di lokasi tersebut, yaitu di Gampong Lamgugop titik 2, tempat pengambilan sampel tanah tersebut memang terkonfinasi, tidak ada saluran air yang memadai yang bisa mengalirkan air dari lokasi tersebut ke tempat lain saat hujan. Mungkin ini salah satu alasan mengapa di lokasi tersebut kandungan garamnya masih sangat tinggi meskipun 10 tahun setelah kejadian tsunami Aceh.

4 KESIMPULAN

Teknik LIBS mampu mendeteksi garam Mg dalam sampel tanah yang terdampak tsunami. Celah pan-

jang gelombang pengukuran yang berpusat pada panjang gelombang 280 nm sangat cocok digunakan mengingat banyak garis Mg I dan Mg II muncul pada jangkauan panjang gelombang yang berpusat pada 280 nm tersebut. Pada jangkauan panjang gelombang ini, garis Fe II 273.95 nm dan Fe II 275.57 nm juga muncul sehingga dapat dijadikan garis emisi untuk normalisasi. Intensitas emisi LIBS Mg II 277.67 nm yang dinormalisasi dengan Fe II 273.95 nm dari sampel yang terdampak tsunami menunjukkan nilai yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan nilai yang dari sampel tidak terkena tsunami. Kondisi fisik aktual mengkonfirmasi hasil pengukuran dengan LIBS tersebut. Hal ini menyiratkan potensi teknik LIBS untuk deteksi garam Mg dalam tanah terdampak tsunami. Studi lanjutan akan dilakukan untuk menguji pada lokasi-lokasi lainnya.

UCAPAN TERIMA KASIH

Para penulis mengucapkan terimakasih atas hibah dana penelitian dari Direktorat Penelitian dan Pengabdian Masyarakat Direktorat Pendidikan Tinggi Kementerian Riset, Teknologi dan Pendidikan Tinggi (KEMENRISTEKDIKTI) pada tahun 2014- 2015 (melalui skema penelitian fundamental) dan tahun 2016 (melalui skema penelitian kerjasama dan publikasi internasional).

REFERENSI

- [1] Hayward H E dan Berstein L. Plant-growth relationships on salt-affected soils. *The Botanical Review*, October–December, 1958, 24 (8-10), pp 584-635.
- [2] Parida A K dan Das A B. Salt tolerance and salinity effects on plants: a review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2005; 60 (3): 324–349
- [3] Zivicaa V dan Bajzab, A. Acidic attack of cement based materials: a review. Part 1. Principle of acidic attack. *Construction and Building Materials*. 2001; 15:331-340.
- [4] Zivicaa V dan Bajzab A. Acidic attack of cement based materials: a review. Part 2. Factors of rate of acidic attack and protective measures. *Construction and Building Materials*. 2002; 16:215–222.
- [5] Zivicaa V dan Bajzab A. Acidic attack of cement based materials: a review. Part 3: research and test methods. *Construction and Building Materials*. 2004; 18:683–688.
- [6] Szczuciński W N, Chaimanee P, Niedzielski G, Rachlewicz D, Saisuttichai T, Tepsuwan Lorenc S and Siepak J. *Polish J. of Environ. Stud.* 2006; 15(5), 793-810.
- [7] Szczucinski W N, Niedzielski P, Rachlewicz G, Sobczynski T, Ziola A, Kowalski A, Lorenc S and Siepak J. *Environ. Geol.* 2005; 49, 321–331
- [8] United Nations Environment Programme (UNEP). After The Tsunami Rapid Environmental Assessment, http://www.unep.org/tsunami/tsunami_rpt.asp. 2005.
- [9] Chaerun S K, Whitman W B, Wirth S J, and Ellerbrock R H, the 2009 National Meeting of the American Society of Mining and Reclamation, Billings, MT, Revitalizing the Environment: Proven Solutions and Innovative Approaches May 30 – June 5, 2009. R.I. Barnhisel (Ed.) Published by ASMR, 3134 Montavesta Rd., Lexington, KY 40502.
- [10] Pearce, F., Holmes, B. "Tsunami: The impact will last for decades." *New Scientist*. 15 January 2005
- [11] Pearce, F. "Tsunami's salt water may leave islands uninhabitable." *New Scientist*. 5 January 2005.
- [12] Winefordner J D, Gornushkin I B, Correll T, Gibb E, Smith B W, and Omenetto N. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*. 2004; 19, 106-108.
- [13] Cremers D A and Radziemski L J. *Handbook of Laser-Induced Breakdown Spectroscopy*. 2006. John Wiley and Sons, Ltd, England.
- [14] Miziolek A W, Palleschi V, and Schechter I (Eds). *Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS)*. 2006. Fundamentals and Applications. Cambridge University Press, New York.
- [15] Idris N, Kagawa K, Sakan F, Tsuyuki K dan Miura S. Analysis of heavy metal pollution in soil using transversely excited atmospheric CO₂ laser-induced plasma by trapping the soil in microstructured holes on metal subtargets. *Appl. Spectrosc.* 2007; 61 (12) 1344-1351.
- [16] Kramida, A., Yu. Ralchenko, J. Reader, and NIST ASD Team (2014). NIST Atomic Spectra Database (ver. 5.2), [Online]. Available: <http://physics.nist.gov/asd>. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD.
- [17] Idris N, Studi awal deteksi emisi spektral magnesium, Mg dari sampel tanah menggunakan teknik *laser-induced breakdown spectroscopy* (LIBS), Prosiding SEMIRATA 2015 bidang MIPA BKS-PTN Barat, Universitas Tanjungpura, Pontianak, hal. 87 - 94
- [18] Ramli M, Idris N, Kurniawan K H, Kagawa K, Uji kemampuan sebuah sistem *compact, commercial laser induced breakdown spectroscopy* (LIBS) untuk deteksi simultan spektrum emisi garam dari tanah, Prosiding SEMIRATA 2015 bidang MIPA BKS-PTN Barat, Universitas Tanjungpura, Pontianak, hal. 144 – 151
- [19] Idris N, Prosiding Simposium Fisika Nasional XXVIII, Kendari, 23-25 November, 2015 (proses review).
- [20] Idris N, Lahna K, Syamsuddin F, Ramli M, Hedwig R, Kurniawan K H, *Study on Emission Spectral Lines of Iron, Fe in Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) on Soil Sample*, Proceeding of The 5th International Conference on Theoretical and Applied Physics, Kendari, Indonesia, November 23-25, 2015, American Institute of Physics (AIP) Conference Proceedings (in reviewing process).

