

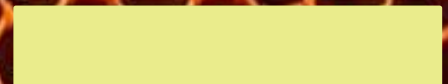
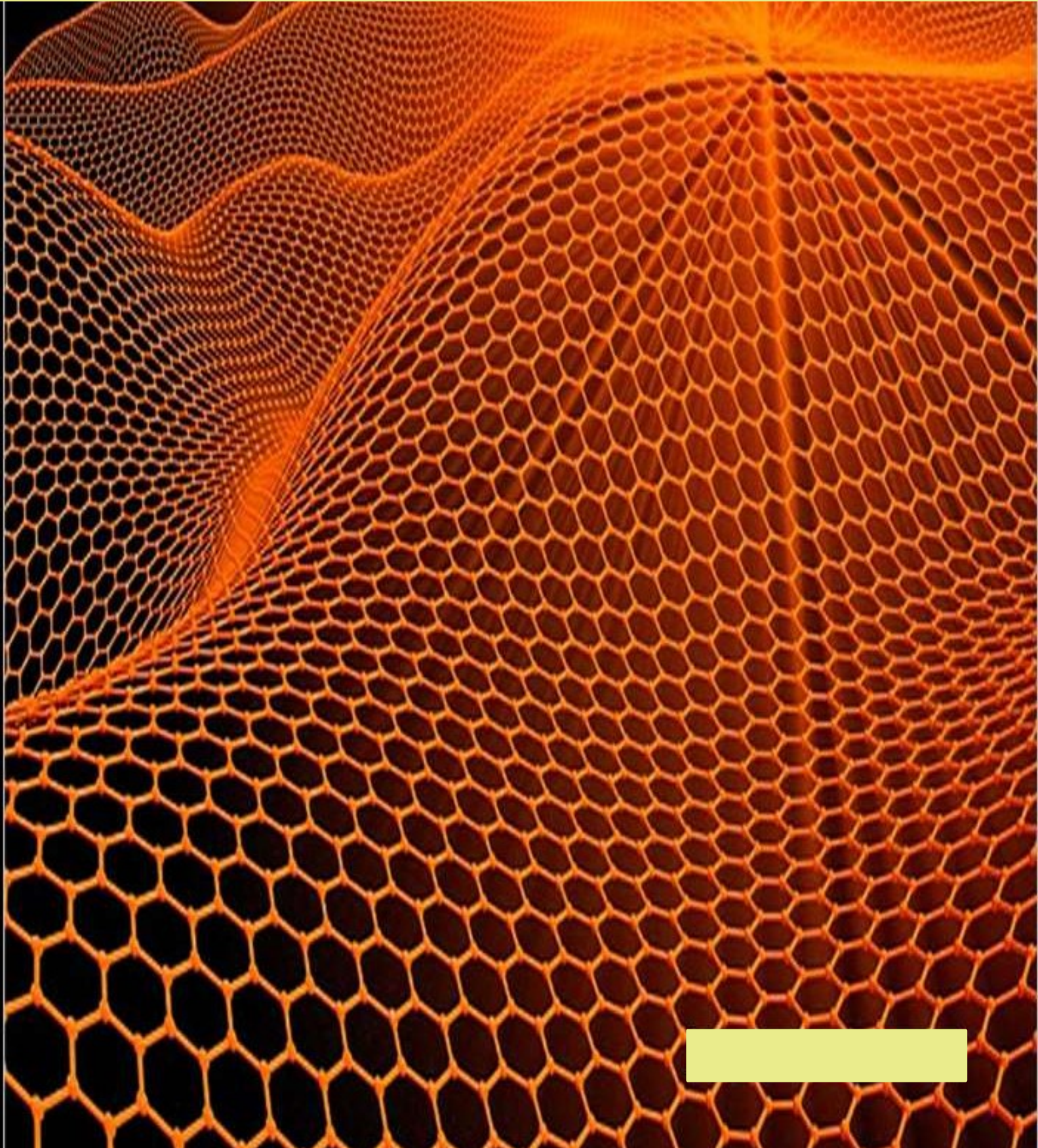
JMEI Jurnal

Material dan Energi Indonesia

e-ISSN 2579-6054
P-ISSN 2087-748X

Volume 08, Nomor 02, Tahun 2018

<http://jurnal.unpad.ac.id/jmei>



JMEI Jurnal Material dan Energi Indonesia

Volume 08, Nomor 02 Desember 2018

Penanggung Jawab

Ketua Departemen Fisika FMIPA Unpad

Ketua Editor:

Ayi Bahtiar, Prodi Fisika FMIPA Unpad

Editor Pelaksana:

Annisa Aprilia, Prodi Fisika FMIPA Unpad

Editor:

Sahrul Hidayat, Unpad

Cukup Mulyana, Unpad

Risdiana, Unpad

Irwan Ary Dharmawan, Unpad

Rahmat Hidayat, ITB

Fitrilawati, Unpad

Lusi Safriani, Unpad

Andri Abdurrachman, Unpad

Jurnal Material dan Energi Indonesia (JMEI) merupakan jurnal ilmiah yang memuat hasil-hasil penelitian yang mencakup kajian teoretik, simulasi dan modeling, eksperimen, rekayasa dan eksplorasi dalam bidang Material dan Energi. Jurnal ini terbit secara berkala sebanyak dua kali dalam setahun (Juni dan Desember). Redaksi menerima naskah ilmiah hasil penelitian, pikiran dan pandangan, review, komunikasi singkat dalam bidang material dan energi. Petunjuk penulisan artikel tersedia di dalam setiap terbitan dan secara online. Artikel yang masuk akan melalui proses seleksi mitra bebestari dan disetujui oleh dewan editor.

Biaya Penerbitan: Rp. 300.000 per artikel

Harga langganan (termasuk ongkos kirim per eksemplar)

Untuk Pemesanan atas nama	Pulau Jawa	Luar Jawa
Lembaga	Rp. 75.000,-	Rp. 85.000,-
Perorangan	Rp. 55.000,-	Rp. 60.000,-

Penerbit: Departemen Fisika FMIPA Unpad

Terbit pertama kali: 2011

Terbit dua kali setahun (Juni, Desember)

Alamat Editor:

Sekretariat Jurnal Material dan Energi Indonesia (JMEI)

Departemen Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Padjadjaran

Jalan Raya Jatinangor Sumedang 45363

Telepon: 022 779 2435

Alamat e-mail jurnal: jmei@phys.unpad.ac.id

Website: <http://jmei.phys.unpad.ac.id>

Daftar Isi

	Hal
Perbandingan Pembersihan Material Berbahan Stanless Steel Menggunakan Ultrasonic Cleaner dan Pembersihan Biasa <i>Irawati Dewi Syahwir, Vera Firmansyah</i>	1-5
Pembuatan Sel Surya Tersensitisasi Dye dengan Oksida Grafena Sebagai <i>Diffuse Material</i> pada Fotoanoda TiO₂ <i>Fitri Yuliasari, Vika Marcelina, Fitrilawati, Norman Syakir, Yeni W. Hartarti, Lusi Safriani, Annisa Aprilia, Rustam E. Siregar</i>	6-12
Fabrikasi Sel Surya Tersensitisasi Dye (<i>Dye Sensitized Solar Cell</i>) dengan Variasi Lapisan <i>Scattering</i> <i>Andrianto Muharam, Waode Sukmawati Arsyad, Ida Usman, Rahmat Hidayat</i>	13-20
Pengembangan dan Modifikasi Sistem Pengukuran Supsebilas dan Permeabilitas Bahan Magnet <i>Yati Maryati, Herlan Rudiyanto, Annisa Aprilia, Togar Saragi</i>	21-25
Pengaruh Konsentrasi Briket Campuran Sekam Padi dan Serutan Kayu Albasia Teradap Emisi Karbon Monoksida dan laju Pembakaran <i>Annisa Nurfitri Sari, Otong Nurhilal, Sri Suryaningsih</i>	26-32
Peningkatan Kelarutan PANI Melalui Turunannya Untuk Bahan Komposit <i>Fitrilawati</i>	33-38
Pemodelan dan Simulasi Amorphous Silicon Quantum Dot (a-SiQD) Menggunakan Metode <i>Extended Hückel Theory</i> (EHT) <i>Setianto, Sahrul Hidayat, Liu Kin Men, Ahmad Rofiq</i>	39-46

PERBANDINGAN PEMBERSIHAN MATERIAL BERBAHAN *STAINLESS STEEL* MENGUNAKAN ULTRASONIC CLEANER DAN PEMBERSIHAN BIASA

IRAWATI DEWI SYAHWIR[†], VERA FIRMANSYAH

*D3 Metrologi dan Instrumentasi,
Akademi Metrologi dan Instrumentasi, Kementerian Perdagangan
Cihanjuang - Bandung*

Abstrak. Pembersihan material berbahan *stainless steel* biasanya dibersihkan dengan kuas atau lap, jika kotoran membandel maka material dibersihkan dengan media alkohol, air destilasi atau pelarut lainnya. Perkembangan teknologi ultrasonik telah memberikan solusi untuk pembersihan material yang sulit dibersihkan dengan pembersihan biasa. Oleh karena itu perlu dibandingkan pembersihan biasa dengan pembersihan menggunakan ultrasonik pada berbagai media, masing-masing media akan memperlihatkan tingkat kebersihannya. Pembersihan material ini dilakukan dengan membandingkan massa sebelum dikotori dengan massa setelah dikotori dan yang telah dibersihkan secara ultrasonik. Hasil pembersihan menunjukkan bahwa pembersihan ultrasonik dengan media *wash benzene* lebih bersih dari pada media alkohol dan air destilasi, dengan pengotor yang hilang sebesar 101,07 %, sedangkan pembersihan dengan media alkohol 95% pengotor yang hilang sebesar 101,04%, dan pembersihan ultrasonik dengan media air destilasi, pengotor yang hilang adalah sebesar 100,29%.

Kata kunci : Ultrasonic, Anak timbangan

Abstract. Cleaning material made of stainless steel is usually cleaned by a brush or cleaning cloth, if when stubborn dirt occurs dirt, the material cleaned by alcohol, distilled water or other solvents. The development of ultrasonic technology has provided solutions for cleaning materials which hard to be clean by ordinary cleaning. Therefore, it is necessary to compare ordinary to ultrasonic cleaning using various medium, and each medium will show cleanliness. Cleaning of this material is done by comparing the mass before it is littered with mass after being contaminated with ultrasonic cleaning. The results of cleaning showed that ultrasonic cleaning with wash benzene media was cleaner than alcohol and distilled water with percentage of missing impurity 101.07%, while cleaning with 95% alcohol impurities percentage of lost 101.04%, and ultrasonic cleaning with medium The impurity distilled water lost percentage of 100.29%.

Keywords: *Ultrasonic, weight*

1. Pendahuluan

Berdasarkan *International Organization of Legal Metrology* OIML R111, B.4, menyatakan bahwa material berbahan *stainless steel* harus dibersihkan dengan kuas atau lap, jika kotoran membandel maka material dibersihkan dengan cairan alkohol, air destilasi atau pelarut lainnya. Dimana perlakuan setiap material disesuaikan dengan tingkatannya, seperti penyimpanan, tata letak saat pengujian maupun pembersihannya [1].

Metode pembersihan saat ini sudah berkembang dengan penggunaan ultrasonik. Ultrasonik merupakan sebuah sensor yang memancarkan gelombang frekuensi tertentu yaitu 20 kHz hingga 20 MHz. Pada Frekuensi 40 kHz pembersihan lebih efektif dibandingkan frekuensi di bawah 25 kHz ataupun diatas 60 kHz. Pada 400 KHz sampai 800 KHz dan kejadian kavitasi yang lebih tinggi sehingga hampir tidak memiliki kemampuan pembersihan dan memiliki kekuatan ledakan cavitation yang lemah [2].

[†] email : irawatidewisyahwir@gmail.com

Dalam tulisan ini dilaporkan kegiatan pembersihan material berbahan *stainless steel* dengan ultrasonik, bermassa 200 miligram dan massa jenis 8000 kg/cm^3 dengan memvariasikan media cairan yaitu air destilasi, alkohol 95% dan *wash* benzin. Hasilnya akan dibandingkan dengan pembersihan biasa tanpa ultrasonik.

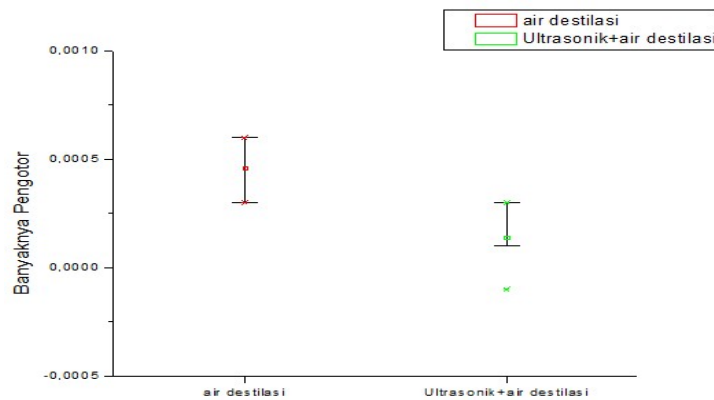
2. Eksperimen

Pembersihan tanpa ultrasonik yaitu : material sebelum dikotori ditimbang terlebih dahulu, kemudian material dikotori dengan minyak dan ditimbang, kemudian dibersihkan dengan lap dengan media air destilasi, alkohol 95% dan *wash* benzin, kemudian ditimbang kembali. Pembersihan dengan menggunakan ultrasonik : material sebelum dikotori ditimbang terlebih dahulu, kemudian material dikotori dengan minyak dan ditimbang, kemudian dibersihkan dengan ultrasonik selama 90 detik dengan media yang bervariasi yaitu air destilasi, alkohol 95% dan *wash* benzin, setelah itu material ditimbang.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Perbandingan Pembersihan material dengan cairan air destilasi dan ultrasonik

Pembersihan dilakukan 5 kali pengujian dimana kotoran yang menempel di material dengan pembersihan ultrasonik dan media air destilasi lebih sedikit dibandingkan pembersihan tanpa ultrasonik. Rata-rata kotoran yang hilang pada pembersihan dengan ultrasonik 101,07% sedangkan tanpa ultrasonik adalah 98,07%. Perbandingan perubahan massa pengotor menggunakan air destilasi dapat dilihat pada gambar 1.

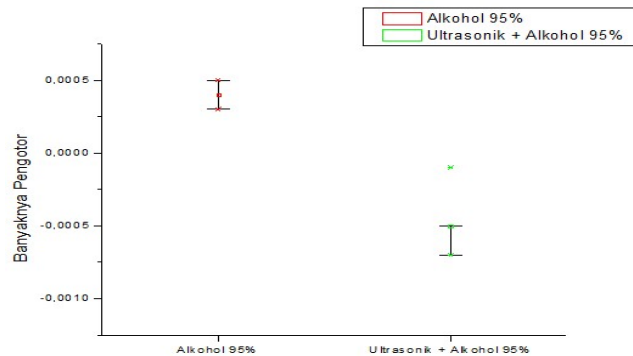


Gambar 1. Perbandingan massa pengotor (gr) yang hilang setelah dibersihkan dengan air destilasi dan ultrasonik

Secara kimiawi, air merupakan senyawa polar yang tidak akan larut dengan minyak yang merupakan senyawa nonpolar. Hal ini dikarenakan minyak hanya dapat membentuk dipol sesaat. Kemampuan zat terlarut membentuk ikatan hidrogen lebih merupakan faktor yang jauh lebih berpengaruh dibandingkan dengan polaritas.

3.2 Perbandingan Pembersihan material menggunakan Alkohol 95%

Massa pengotor yang dapat dibersihkan dengan pembersihan dengan alkohol 95% tanpa ultrasonik rata-rata sebesar 97,88 % sedangkan massa pengotor yang dapat dibersihkan dengan ultrasonik dan cairan alkohol 95% adalah sebesar 101,04 %. Perbandingan tersebut dapat dilihat dalam bentuk grafik pada gambar 2.

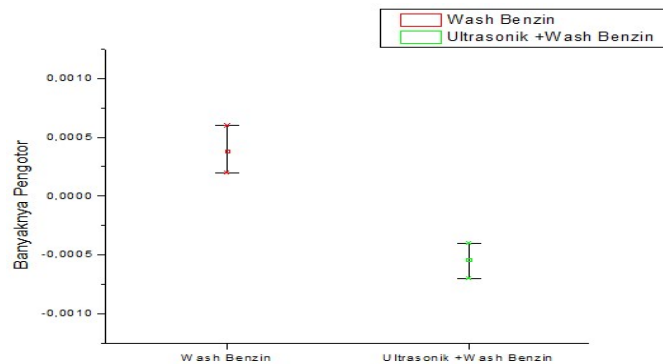


Gambar 2. Perbandingan massa pengotor (gr) yang hilang setelah dibersihkan dengan alkohol 95% dan ultrasonik.

Secara kimiawi, alkohol salah satu zat pelarut organik yang sering digunakan untuk melarutkan lemak dalam proses analisa lemak. Fungsi penambahan alkohol adalah untuk melarutkan lemak atau minyak pada sampel agar dapat bereaksi dengan basa alkali. Disebabkan penggunaan alkohol berfungsi untuk melarutkan minyak, sehingga alkohol (etanol) yang digunakan perlu memiliki konsentrasi yang berada di kisaran 95-96%. Kadar alkohol 95 % dikategorikan sebagai pelarut lemak yang baik.

3.3 Perbandingan Pembersihan material dengan cairan wash benzene

Massa pengotor yang dapat dibersihkan pada proses pembersihan material dengan cairan wash benzin tanpa menggunakan *ultrasonic cleaner* adalah sebesar 98,02 %, sedangkan massa pengotor yang hilang pada pembersihan dengan cairan yang sama dan menggunakan *ultrasonic cleaner* adalah sebesar 101,07 %. Dapat disimpulkan bahwa terdapat kotoran lain sebelum material dibersihkan tanpa ultrasonic yang akhirnya turut hilang ketika menggunakan perangkat pembersihan ultrasonik. Hasil perbandingan tersebut dapat dilihat pada gambar 3,



Gambar 3. Perbandingan massa pengotor (gr) yang hilang setelah dibersihkan dengan wash benzin dan ultrasonik

Secara kimiawi, *wash* benzin merupakan pelarut organik nonpolar yang dapat melarutkan lemak atau minyak yang merupakan senyawa organik karena memiliki polaritas yang sama dengan pelarut. Sehingga pembersihan material dengan perangkat ultrasonik menggunakan media/cairan *wash* benzin menghasilkan proses pembersihan yang lebih efektif.

Dari ketiga perbandingan diatas maka dapat dilihat perbandingan berdasarkan variasi penggunaan media/cairan pembersihnya, yang ditabulasikan pada tabel 1.

Tabel 1. Perbandingan jumlah pengotor yang hilang

Pembersihan	Pengotor yang Hilang (%)	Pencucian	Pengotor yang Hilang (%)
Ultrasonic cleaner dan Air destilasi	100,29	Air destilasi	98,07
Ultrasonic cleaner dan Wash Benzin	101,07	Wash Benzin	98,02
Ultrasonic cleaner dan Alkohol 95%	101,04	Alkohol 95%	97,88

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian pembersihan dengan ultrasonik menggunakan media cairan yang berbeda, persentase hilangnya pengotor tanpa ultrasonik dan dengan ultrasonik adalah sebagai berikut :

- Pembersihan dengan cairan air destilasi, pengotor yang hilang adalah sebesar 98,07% sedangkan dengan ultrasonik dan air destilasi, pengotor yang hilang sebesar 100,29 %. Untuk pembersihan dengan alkohol 95% pengotor yang hilang 95,88% sedangkan menggunakan ultrasonik pengotor yang hilang adalah 101,04%. Untuk pembersihan dengan *wash* benzin, pengotor yang hilang sebesar 98,02 % sedangkan menggunakan ultrasonik sebesar 101,07%.
- Untuk persentase hilangnya pengotor pada material melebihi 100% menandakan adanya pengotor lain yang berada pada material sebelum diberikan pengotor tambahan, dan turut hilang ketika proses pembersihan dengan ultrasonik. Pembersihan dengan ultrasonik dengan media cairan mampu menghilangkan pengotor yang lebih banyak daripada tanpa ultrasonik.
- Untuk penelitian berikutnya akan menggunakan foto mikro yang bertujuan untuk mengetahui sejauh mana ultrasonik tersebut membersihkan bahan *stainless steel*.

Ucapan terima kasih

Sebagian dari penelitian ini dibiayai oleh Hibah Dana Penelitian DIPA PPSDK 2017 . Para penulis mengucapkan terima kasih kepada PPSDK, AKMET dan Laboratourium PPSDK untuk bantuan dalam penelitian ini.

Daftar Pustaka

1. Recommendation *Organisation Internationale de Metrologie Legale* (OIML) No.111. 2004. Weights of classes E1, E2, F1, F2, M1, M1–2, M2, M2–3 and M3.
2. Fuchs F.Jhon. 2002. Ultrasonic cleaning: Fundamental Theory and Aplication, *Blackstone-Ney Ultrasonic*. NY.

3. Hesson R. James. 2013. Fundamentals of Ultrasonic Cleaning, Photomacrography documentation purposes at the <http://extreme-macro.co.uk>.
4. Keputusan DIRJEN PDN No. 40/PDN/KEP/3/2010. 2010. *Syarat Teknis Anak Timbangan Ketelitian Biasa dan Khusus*, Bandung
5. Surat Edaran Direktur Metrologi no 4599/Dirmet-1.1/VI/1999 tentang Syarat-syarat teknik khusus anak timbangan ketelitian biasa dan ketelitian khusus.
6. Timothy J. Mason. 2015. *Journal Ultrasonic cleaning*: An historical perspective, Sonochemistry Group, James Starley Building, Faculty of Health and Life Sciences, Coventry University, Coventry CV15FB UK
7. Technowash. 2018. Introduction Ultrasonic Cleaning, www.technowash.com
8. Netti Herlina, M.Hendra, 2002. Lemak dan Minyak, Universitas Utara, Medan.

PEMBUATAN SEL SURYA TERSENSITISASI *DYE* DENGAN OKSIDA GRAFENA SEBAGAI *DIFFUSE MATERIAL* PADA FOTOANODA TiO_2

FITRI YULIASARI¹, VIKA MARCELINA, NORMAN SYAKIR, YENI W. HARTATI, LUSI SAFRIANI, ANNISA APRILIA[†], RUSTAM E. SIREGAR

¹Departemen Fisika,
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Padjadjaran
Jl. Raya Bandung-Sumedang Km 21, Jatinangor 45363

²Departemen Kimia,
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Padjadjaran
Jl. Raya Bandung-Sumedang Km 21, Jatinangor 45363

Abstrak. Sel surya tersensitisasi dye atau DSSC (Dye-Sensitized Solar Cell) terdiri dari tiga komponen utama yaitu fotoanoda TiO_2 teradsorpsi dye, larutan elektrolit dan elektroda lawan. Pada penelitian ini telah dibuat sel surya tersensitisasi dye dengan lapisan oksida grafena atau graphene oxide (GO) yang dideposisikan secara elektrokimia pada lapisan fotoanoda TiO_2 mesopori. Proses deposisi elektrokimia diamati melalui pengukuran cyclic voltammetry (CV) secara potensio-static pada rentang tegangan -1,6-0 Volt dengan scan rate 50 mV/s. Karakterisasi sel surya tersensitisasi dye diukur melalui pengukuran I-V dengan intensitas daya yang dipancarkan sebesar 36,5 mW/cm². Efisiensi (η) terbaik yang berhasil dicapai adalah pada sel surya dengan fotoanoda $\text{TiO}_2/\text{rGO}/\text{TiO}_2\text{MC-SP}$ sebesar 3,02% dengan nilai V_{OC} 0,61 Volt, J_{SC} 3,3 mA/cm² dan fill factor (FF) 38,25%. Keberadaan rGO diantara lapisan TiO_2 dapat mempercepat proses transport elektron dan mengurangi rekombinasi muatan sehingga dapat meningkatkan nilai fotoarus yang dihasilkan sel surya.

Kata kunci : oksida grafena (GO), deposisi elektrokimia, DSSC, fotoanoda, TiO_2 mesopori

Abstract. Dye-sensitized Solar Cell (DSSC) consists of three main layers i.e. TiO_2 photoanode adsorbed by dyes, electrolyte, and counter electrode. In this research, DSSC was fabricated with depositing electrochemically GO layer into TiO_2 mesoporous photoanode. Electrochemical deposition process was observed by potentiostatic cyclic voltammetry (CV) measurements in the voltage range -1.6-0 Volt with scan rate 50 mV/s. The characterization of DSSC was studied by I-V measurements under the light irradiation 36.5 mW/cm². Based on J-V measurements we found that DSSC with $\text{TiO}_2/\text{rGO}/\text{TiO}_2\text{MC-SP}$ photoanode show higher efficiency 3.02% with V_{OC} of 0.61 Volt, J_{SC} of 3.3 mA/cm², and FF of 38.25%. The presence of rGO on TiO_2 photoanode can accelerate electron transport and can inhibit charge recombination leading to produce a higher photocurrent density

Keywords: graphene oxide (GO), electrochemical deposition, DSSC, photoanode, TiO_2 mesoporous

1. Pendahuluan

Dye-Sensitized Solar Cell (DSSC) merupakan sel surya berbasis zat warna tersensitisasi dimana sistem ini dapat mengkonversi energi surya menjadi energi listrik. Sel DSSC umumnya terbuat dari sepasang substrat kaca berlapis bahan TCO (*transparent conducting oxide*) sebagai elektroda, nanokristal TiO_2 berpori sebagai fotoanoda, zat warna (*dye*) sebagai *fotosensitizer*, elektrolit redoks yang mengandung ion iodide dan triiodida (I^-/I_3^-), serta lapisan platina (Pt) sebagai katalis pada elektroda lawan [1]. Semua komponen tersebut disusun bertumpuk dengan struktur *sandwich* dimana lapisan atas adalah fotoanoda sebagai lapisan penerima foton, lapisan bawah adalah elektroda lawan sebagai katalis, dan ditengahnya adalah elektrolit untuk meregenerasi elektron.

[†] email : a.aprilia@phys.unpad.ac.id

Titanium dioksida (TiO₂) adalah jenis material metal oksida semikonduktor yang paling umum digunakan sebagai fotoanoda pada DSSC karena memberikan pengaruh cukup besar terhadap kestabilan efisiensi pada sel surya [2]. Namun proses transport elektron di dalam pori-pori nanopartikel TiO₂ yang belangsung secara acak akan menimbulkan proses rekombinasi muatan (*electron-hole*) di dalamnya sehingga kinerja devais menjadi menurun [3]. Untuk mengatasi masalah ini merekayasa fotoanoda dengan tujuan membuat transport muatan yang efisien adalah hal yang penting untuk meningkatkan kinerja devais DSSC [4]. Beberapa upaya telah dilakukan untuk meningkatkan transport elektron dan mencegah terjadinya rekombinasi muatan adalah dengan cara memodifikasi permukaan TiO₂ dengan doping material logam ataupun non-logam [5], menggabungkan TiO₂ dengan semikonduktor lain, ataupun membuat material hibrid dengan campuran bahan karbon seperti *carbon nanotube* (CNT) [6], *graphene oxide* (GO) dan *reduced graphene oxide* (rGO) [7]. Material hibrid TiO₂ dengan bahan karbon baru-baru ini telah menarik banyak perhatian, terutama aplikasinya terhadap DSSC. Diantara bahan-bahan karbon, grafena menjadi salah satu material yang mendapat perhatian luas dalam dekade ini.

Grafena atau *Graphene* merupakan material 2D monoatomik dari satu lapis grafit yang ditemukan pada tahun 2004 oleh Andre K. Geim dan K. Novoselov. Grafena merupakan material yang memiliki sifat mekanik, sifat termal, sifat listrik, dan sifat optik yang baik [8]. Struktur grafena yang terdiri dari lapisan-lapisan mengakibatkan grafena memiliki sifat konduktif karena memiliki nilai bandgap nol (*zero bandgap*), selain itu mobilitas pembawa muatannya mencapai 200.000 cm²V⁻¹s⁻¹ [9]. Karena sifatnya yang unik ini maka penggunaan material grafena dalam DSSC telah banyak dikembangkan dan telah menunjukkan efisiensi konversi energi yang baik, contohnya dijadikan sebagai material fotoanoda [10] ataupun elektroda lawan [11]. Namun demikian sulit sekali memperoleh grafena murni yang benar-benar konduktif. Maka dari itu, dilakukan metode paling sederhana untuk memperoleh material yang mirip dengan grafena. Caranya adalah dengan mengurangi kandungan oksigen pada oksida grafena atau *graphene oxide* (GO) dengan metode pemanasan pada suhu tertentu sehingga membentuk material oksida grafena tereduksi atau *reduced graphene oxide* (rGO).

Di dalam GO terdapat kandungan oksigen yang cukup banyak sehingga dapat dimanfaatkan untuk membentuk material komposit dengan TiO₂. Baru-baru ini material komposit TiO₂/rGO telah diaplikasikan pada DSSC sebagai material fotoanoda [12]. Penambahan rGO dapat meningkatkan kinerja sel surya karena dapat meningkatkan adsorpsi *dye* dan menurunkan resistansi internal sehingga transport elektron menjadi semakin cepat dan mengurangi rekombinasi muatan di dalam sel surya. Keberadaan rGO dapat mempercepat gerakan elektron dan mengurangi proses kembalinya elektron (*electron-back transfer*) sehingga akan menghasilkan rapat arus yang lebih tinggi [13]. Maka dari itu, pada penelitian ini akan di bahas penggunaan GO sebagai material fotoanoda DSSC yang dibuat dengan menggunakan teknik deposisi elektrokimia. Efek penggunaan GO sebagai fotoanoda DSSC telah diamati dan dibandingkan dengan devais sel surya tanpa modifikasi fotoanoda TiO₂. Kinerja devais sel surya diamati melalui pengukuran arus - tegangan dan kualitas persambungan dihitung melalui persamaan dioda tunggal (*single-diode model equation*) untuk menghitung beberapa parameter fisik seperti hambatan seri (R_s), hambatan paralel (R_{SH}), dan faktor ideal (n).

2. Eksperimen

Fabrikasi sel surya diawali dengan proses pembuatan fotoanoda sebagai lapisan penyerap foton dari cahaya yang diberikan pada sel surya. Pembuatan lapisan TiO₂ dilakukan dengan teknik screen printing dua kali pelapisan pada substrat ITO (Indium Tin Oxide). Lapisan TiO₂ yang pertama adalah jenis mesopori TiO₂T-SP (Solaronix) yang dideposisikan pada substrat ITO yang dilanjutkan dengan proses pemanasan sampai suhu 500°C selama 30 menit untuk merubah fasa rutile menjadi anatase. Kemudian pada lapisan TiO₂ tersebut dilapiskan GO (Graphene) secara elektrokimia melalui pengukuran cyclic voltammetry (CV) secara potensio-static pada rentang tegangan -1,6-0

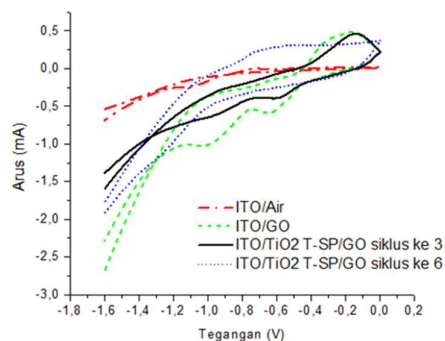
Volt dengan scan rate 50 mV/s. Selanjutnya dilakukan pelapisan TiO₂MC-SP (Solaronix) jenis macrochannel dengan teknik screen printing satu kali pelapisan pada ITO/TiO₂/GO dilanjutkan dengan proses pemanasan 500°C selama 30 menit dan diharapkan kandungan oksigen pada lapisan GO akan berkurang melalui proses pemanasan sehingga membentuk lapisan oksida grafena tereduksi (rGO) yang terperangkap diantara lapisan TiO₂.

Selanjutnya ITO/TiO₂/rGO/TiO₂MC-SP di rendam dalam larutan dye. Larutan dye yang digunakan adalah jenis ruthenium N719 (Solaronix) sebanyak 10,4 mg yang dilarutkan pada 5 mL ethanol dan dicampurkan dengan chenodeoxycolicacid 0,1 gr yang sebelumnya telah dilarutkan pada ethanol 5 mL, setelah proses pencampuran ditambahkan ethanol 2,5 mL. Perendaman fotoanoda di dalam larutan dye dilakukan selama ± 24 jam. Setelah proses perendaman selesai, fotoanoda diangkat dan dibilas dengan acetronitrile untuk menghilangkan sisa partikel dye yang tidak diserap. Kemudian dilakukan proses perakitan sel surya dengan menggunakan surylin (solaronix SA) dengan ketebalan 25 μ m sebagai pemisah antara fotoanoda dan elektroda lawan. Substrat FTO yang terdeposisi platina (Solaronix) digunakan sebagai elektroda lawan pada sel surya. Struktur sel surya adalah ITO/TiO₂/RGO/TiO₂MC-SP/Ru-dye/Mosalyte/Pt/FTO. Elektrolit mosalyte (Solaronix) selanjutnya diinjeksikan melalui lubang yang terdapat pada elektroda lawan dengan suntikan khusus, setelah elektrolit masuk ke dalam sel surya kemudian lubang ditutup dengan tape bening.

Spektrum absorbansi dari substrat ITO, ITO/TiO₂, dan ITO/TiO₂/rGO/TiO₂MC-SP diamati melalui pengukuran spektroskopi Ultraviolet-Visible. Morfologi permukaan dari ITO, ITO/TiO₂, ITO/TiO₂/GO, dan ITO/TiO₂/rGO/TiO₂MC-SP dianalisa melalui scanning electron microscopy (SEM). Untuk mengetahui kinerja divais sel surya dilakukan pengukuran arus – tegangan (I-V) dalam keadaan tanpa penyorotan (gelap) dan dengan penyorotan (terang) menggunakan sumber lampu LED dengan intensitas daya yang dipancarkan sebesar 36,5 mW/cm².

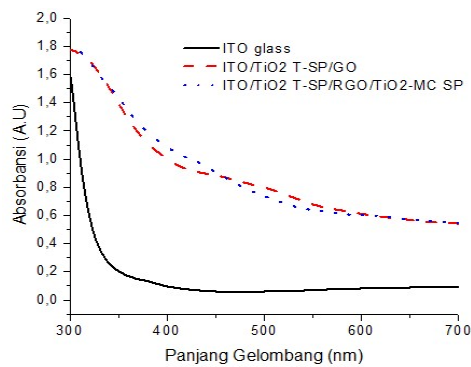
3. Hasil dan Pembahasan

Gambar 1 menunjukkan kurva arus (I) dan tegangan (V) selama proses deposisi elektrokimia lapisan GO pada substrat ITO dan ITO/TiO₂. Setiap siklus deposisi dalam kurva CV menegaskan adanya pasangan redoks yang menunjukkan bahwa lapisan GO terdeposisi dengan baik. Perubahan arus puncak saat diberikan tegangan yang semakin meningkat membuktikan bahwa deposisi GO pada lapisan ITO/TiO₂ telah terjadi. Perbedaan bentuk dan perubahan arus puncak dalam suspensi GO menegaskan bahwa proses deposisi GO pada substrat ITO dan lapisan ITO/TiO₂ mesopori telah bekerja selama siklus berlangsung [14]. Kurva CV pada air memiliki luas permukaan yang lebih kecil dibandingkan dengan dalam suspensi GO, menunjukkan bahwa proses redoks relatif terjadi.

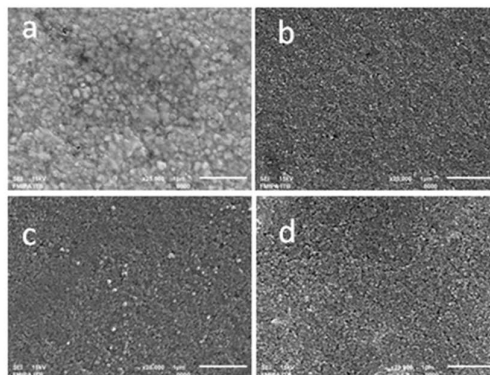


Gambar 1. Kurva arus-tegangan selama proses deposisi GO secara

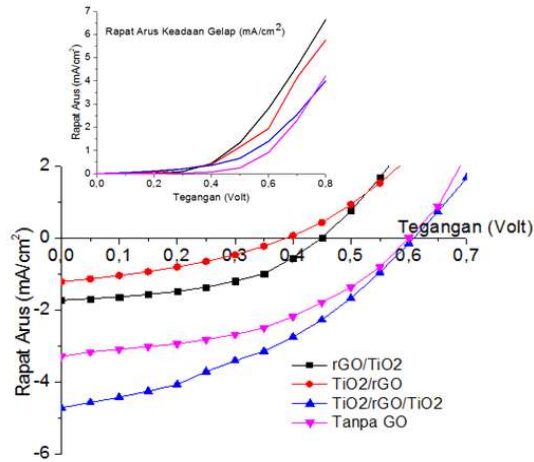
Untuk membuktikan keberadaan lapisan GO pada ITO/ TiO_2 , telah dilakukan pengukuran spektroskopi UV-Visible pada substrat ITO dan sample ITO/ TiO_2 /GO (Gambar 2). Adanya peningkatan kurva absorbansi di daerah *visible* setelah lapisan GO dideposisikan pada sample ITO/ TiO_2 /GO dan ITO/ TiO_2 /rGO/ TiO_2 MC-SP menunjukkan bahwa lapisan GO telah berhasil di deposisi dan setelah proses pemanasan lapisan GO menjadi lapisan rGO. Hasil pengukuran SEM sampel ITO/ TiO_2 /rGO/ TiO_2 MC-SP ditunjukkan oleh Gambar 3. Gambar 3a menunjukkan sampel GO yang dideposisikan sebanyak 6 siklus pada substrat ITO. Lapisan GO terlihat meskipun tidak terlalu tampak homogen. Setelah proses deposisi lapisan GO sebanyak 3 siklus pada ITO/ TiO_2 (Gambar 3c) terlihat bahwa morfologi dari TiO_2 tidak berubah meskipun lapisan GO yang terdeposisi tidak terlihat begitu jelas. Hal ini menunjukkan bahwa lapisan ITO/ TiO_2 tidak mengalami kerusakan akibat proses deposisi GO secara elektrokimia (Gambar 3b). Gambar 3d menunjukkan sampel fotoanoda ITO/ TiO_2 /rGO/ TiO_2 MC-SP. Walaupun lapisan rGO tidak terlihat jelas, hasil ini menegaskan bahwa deposisi lapisan GO secara elektrokimia tidak mengubah struktur permukaan TiO_2 . Lapisan rGO terbentuk diantara lapisan TiO_2 mesopori dan TiO_2 *macrochanel* membentuk *diffuse material* [12]. Keberadaan rGO diantara lapisan TiO_2 dapat meningkatkan transport elektron dan mengurangi rekombinasi muatan di dalam sel surya. Hal ini dapat dibuktikan melalui hasil pengukuran arus - tegangan sampel DSSC (Gambar 4).



Gambar 2. Spektrum absobansi UV-Visible fotoanoda ITO/ TiO_2 T-SP/GO/ TiO_2 MC-SP



Gambar 3. Hasil pengukuran SEM sampel (a) ITO/GO 6 siklus, (b) ITO/ TiO_2 , (c) ITO/ TiO_2 /GO, (d) ITO/ TiO_2 /RGO/ TiO_2 MC-SP.



Gambar 4. Kurva rapat arus – tegangan (J-V) dari DSSC dalam keadaan tanpa penyorotan (gelap) dan dalam penyorotan (terang) menggunakan LED dengan intensitas daya yang dipancarkan sebesar $36,5 \text{ mW/cm}^2$.

Daya listrik yang dihasilkan sel surya ketika mendapatkan cahaya ditentukan dari kemampuan perangkat sel surya tersebut untuk memproduksi arus ketika diberi tegangan melalui beban pada waktu yang sama. Kemampuan ini direpresentasikan oleh kurva rapat arus – tegangan (J-V). Parameter sel surya seperti V_{OC} , J_{SC} , FF, dan η diperoleh dari kurva J-V, sementara itu parameter fisik seperti hambatan seri (R_S), hambatan paralel (R_{SH}), dan faktor ideal (n) dihitung melalui persamaan dioda tunggal [13]. Hasil fitting dengan persamaan karakteristik diode, dapat dilihat pada gambar 5. Semua parameter sel surya hasil fitting ditabulasikan pada Tabel 1. Sel surya dengan modifikasi fotoanoda $\text{TiO}_2/\text{rGO}/\text{TiO}_2\text{MC-SP}$ menunjukkan adanya kenaikan efisiensi dari 2,13% menjadi 3,02% dibandingkan sel surya tanpa modifikasi fotoanoda ($\text{TiO}_2/\text{TiO}_2\text{MC-SP}$). Hal ini menunjukkan bahwa keberadaan rGO diantara lapisan TiO_2 tersebut berperan sebagai *diffuse material* yang dapat mempercepat transport elektron sehingga meningkatkan nilai J_{SC} ($4,73 \text{ mA/cm}^2$).

Tabel 1. Parameter devais sel surya dengan modifikasi fotoanoda.

Fotoanoda	V_{OC} (V)	J_{SC} mA/cm^2	P_{max} W/cm^2	Luas (cm^2)	FF %	η %	R_S $\Omega.\text{cm}^2$	R_{SH} $\Omega.\text{cm}^2$	n
RGO/ TiO_2	0,45	1,73	0,35	0,16	44,87	0,96	24	8675	3,2
TiO_2/RGO	0,39	1,22	0,16		34,46	0,45	35	7650	4,6
$\text{TiO}_2/\text{RGO}/\text{TiO}_2\text{MC-SP}$	0,61	4,73	1,1		38,25	3,02	17	10500	6,6
$\text{TiO}_2/\text{TiO}_2\text{MC-SP}$	0,6	3,3	0,78		39,34	2,13	14	8150	5,3

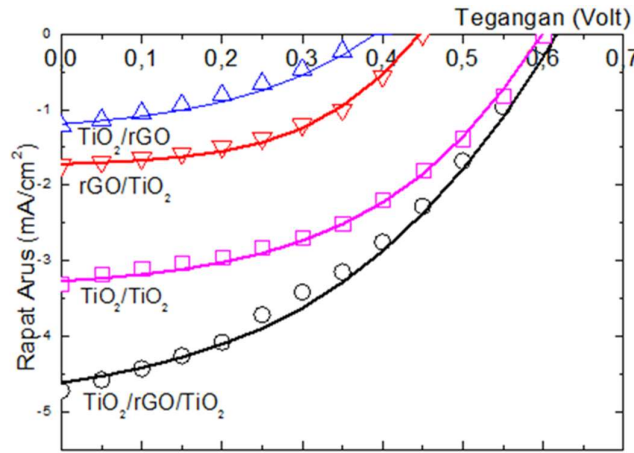
Sementara itu untuk mengetahui kualitas persambungan pada sel surya maka ditentukan nilai parameter fisik hambatan seri (R_S), hambatan paralel (R_{SH}), dan faktor ideal (n). Pada sel surya idealnya memiliki nilai R_S yang kecil dan nilai R_{SH} yang besar. Nilai R_S berkaitan dengan kualitas persambungan antara lapisan aktif dengan elektroda pada sel surya. Nilai R_{SH} menunjukkan arus kebocoran akibat dari proses fabrikasi yang kurang baik (*manufacturing defect*) yang terminimalisir sehingga menghasilkan nilai fotoarus yang baik saat sel surya bekerja di bawah penyorotan. Sementara itu faktor ideal (n) berkaitan dengan ukuran dari kualitas persambungan dan jenis rekombinasi yang terjadi dalam sel surya, idealnya $n = 1$ [16]. Persamaan dioda ideal dapat dinyatakan oleh persamaan berikut:

$$J_{cell} = J_0 \left\{ \exp \left[\frac{q}{nk_B T} (V - J \cdot R_s) - 1 \right] \right\} + \frac{V - J \cdot R_s}{R_{SH}} - J_{sc} \quad (1.1)$$

sementara itu, faktor ideal diperoleh melalui persamaan berikut:

$$V_{oc} = \frac{nk_B T}{q} \ln \left(\frac{J_{sc}}{J_0} \right) \quad (1.2)$$

dengan J_0 adalah rapat arus saturasi ketika sel surya dalam keadaan tidak disinari, q adalah muatan elektron, n adalah faktor ideal, k_B adalah konstanta Boltzman, dan T adalah suhu (dalam K).



Gambar 5. Fitting Kurva J-V melalui persamaan dioda tunggal. Titik-titik menunjukkan data hasil eksperimen dan garis menunjukkan kurva fitting

Pada surya dengan modifikasi fotoanoda rGO/TiO₂ dan fotoanoda TiO₂/rGO keduanya memberikan hasil efisiensi yang rendah. Hal ini berkaitan dengan nilai hambatan seri (R_s) di dalam sel yang cukup besar jika dibandingkan sel surya lainnya. Ini menunjukkan bahwa kualitas persambungan antara lapisan aktif dan elektroda sel surya kurang baik sehingga menyebabkan nilai V_{oc} dan J_{sc} menurun. Pada sel surya dengan fotoanoda TiO₂/rGO/TiO₂MC-SP dan fotoanoda tanpa modifikasi menunjukkan nilai V_{oc} relatif sama yang menunjukkan bahwa kualitas persambungan keduanya sebanding. Sementara itu, nilai faktor ideal pada sel surya TiO₂/rGO/TiO₂MC-SP menunjukkan nilai 6,6 yang berkaitan dengan proses rekombinasi muatan yang tinggi dan mungkin terjadi di dalam sel sehingga menghasilkan nilai FF yang rendah. Namun demikian, sel surya dengan fotoanoda TiO₂/rGO/TiO₂MC-SP memberikan nilai V_{oc} (0,61 V) dan nilai J_{sc} (4,73 mA/cm²). Nilai ini paling tinggi diantara sel surya lainnya. Hal ini membuktikan bahwa penambahan lapisan rGO diantara lapisan TiO₂ dapat mempercepat proses transport muatan dan mengkompensasi terjadinya rekombinasi muatan di dalam sel surya sehingga dapat memberikan nilai efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan dengan tanpa penggunaan lapisan rGO.

4. Simpulan

Lapisan GO telah berhasil dideposisikan dengan teknik deposisi elektrokimia melalui pengukuran *cyclic voltammetry* (CV) secara *potensio-static* pada rentang tegangan -1,6-0 Volt dengan *scan rate*

50 mV/s pada substrat ITO dan ITO/TiO₂. Hasil pengukuran J-V menunjukkan bahwa penambahan lapisan rGO diantara lapisan TiO₂ mesopori dan TiO₂ *macrochannel* dapat meningkatkan efisiensi divais. Peningkatan efisiensi berkaitan dengan meningkatnya fotoarus yang dihasilkan pada sel surya dengan modifikasi fotoanoda TiO₂/rGO/TiO₂MC-SP ($J_{SC} = 4,73 \text{ mA/cm}^2$). Ini menunjukkan bahwa keberadaan lapisan rGO diantara lapisan TiO₂ dapat mempercepat transport elektron dan mengkompensasi rekombinasi muatan di dalam sel surya sehingga dapat menghasilkan fotoarus yang tinggi.

Daftar Pustaka

1. O'Regan and M. Gratzel, 1991, *Letters to Nature*, **353**, 737-739
2. Nair AS, Peining Z, Babu VJ, Shengyuan Y, Ramakrishna S, 2011, *Physical Chemistry Chemical Physics*, **13**, 21248–21261. Aosong (Guangzhou) Electronics Co.
3. Kopidakis N, Neale N R, Zhu K, van de Lagemaat J, Frank A J, 2005, *Applied Physics Letters*, **87**, 202106–202106-3.
4. J Song, Z Yin, Z Yang, P Amaladass, S Wu, J Ye, Y Zhao, W-Q Deng, H Zhang, and X-W Liu, 201, *Chem. Eur. J*, **17**, 10832 – 10837.
5. Kovendhan M, Joseph D P, Manimuthu P, Sambasivam S, Karthick S N, Vijayarangamuthu K, Sendilkumar A, Asokan K, Kim H J, Choi B C, Venkateswaran C, Mohan R, 2013, *App. Surf. Sci*, **284**, 624–633.
6. Macak JM, Schmidt-Stein F, Schmuki P. 2007, *Electrochemistry Communications*, **9**, 1783–1787.
7. Lim S P, Pandikumar A, Lim Y S, Huang N M, Lim H N, 2014, *Scientific Reports* **4**.
8. C H Ng, H N Lim, S Hayase, I Harrison, A Pandikumar and N M Huang, 2015, *J. Power Sources*, **296**, 169–185.
9. R Nair, P Blake, A Grigorenko, K Novoselov, T Booth, T Stauber, N Peres and A Geim, 2008, *Science*, **320**, 1308–1308.
10. E Nouri, M R Mohammadi, P Lianos, 2016, *Electrochimica Acta*, 219, 38-48
11. F Yuliasari, A Aprilia, N Syakir, L Safriani, T Saragi, Risdiana, S Hidayat, A Bahtiar, R Siregar, Fitrilawati, 2017, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 196, 012049
12. L Wei, P Wang, Yulin Yang, Z Zhan, Y Dong, W Song and R Fan, 2018, *Inorg. Chem. Front.* **5**, 54.
13. S P Lim, A Pandikumar, N M Huang, and H N Lim, 2015. *Int. J. Energy Res.* **39**, 812–824.
14. V Marcelina, H Addini, N Syakir, A Bahtiar, S Wyantuti, Y W Hartati and Fitrilawati, 2018. *J. Phys.: Conf. Ser.* **1080**, 012028.
15. S Sarker, H W Seo, K S Lee, Y K Jin, H Ju, and D M Kim, 2015. *Sol. Energy*, **115**, 390–395
16. S Sarker, H W Seo, 2014, *Journal of Power Sources*, **248**, 739-744.

FABRIKASI SEL SURYA TERSENSITISASI DYE (*DYE SENSITIZED SOLAR CELL*) DENGAN VARIASI LAPISAN *SCATTERING*

ANDRIANTO MUHARAM¹, WAODE SUKMAWATI ARSYAD^{1†}, IDA USMAN¹, RAHMAT
HIDAYAT²

¹Program Studi Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam,
Universitas Halu Oleo, Jl. Prof. HEA Mokodompit No. 1, Kendari, 93232

²Fisika magnetik dan Fotonik, Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan
Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesha No. 10,
Bandung,

Abstrak. Telah dilakukan penelitian tentang fabrikasi sel surya tersensitisasi dye (*Dye sensitized solar cell*) dengan variasi lapisan scattering, untuk mengetahui pengaruh penggunaan lapisan scattering yang berbeda terhadap daya serap dye di dalam lapisan TiO₂ melalui pengukuran absorbansi, dan pengaruh penggunaan lapisan scattering terhadap unjuk kerja sel surya melalui pengukuran I-V. Hasil pengukuran absorbansi menunjukkan bahwa tidak ada hubungan yang linear antara peningkatan nilai absorbansi dengan peningkatan nilai efisiensi sel DSSC yang dihasilkan. Penggunaan lapisan scattering terbukti memperpanjang lintasan cahaya didalam lapisan TiO₂ yang tampak dari spektrum absorbansi yang dihasilkan dimana daerah penyerapannya menjadi lebih panjang melewati daerah cahaya tampak (Sampel B dan C) dan memasuki daerah penyerapan cahaya *Near Infrared* (NIR) (Sampel D). Hasil pengukuran I-V, sampel C2 menunjukkan efisiensi terbaik yang dihasilkan oleh sel yang menggunakan *Ti-Nanooxide reflector* sebagai lapisan scattering yaitu sebesar 3,43%, J_{sc} sebesar 9,19 mA/cm² dan V_{oc} sebesar 0,69 Volt. Berdasarkan hasil penelitian ini, lapisan scattering yang paling cocok digunakan pada sel DSSC adalah menggunakan *Ti-nanooxide reflector*.

Kata kunci : DSSC, lapisan *scattering*, absorbansi, V_{oc}, J_{sc}

Abstract. The research about dye sensitized solar cells have been done with scattering layer variations, in order to study the effect scattering layer to the quantity of dye absorbance in TiO₂ layer. The current-voltage characteristic also investigated during this research to observed the effect of scattering layer of the cell. From UV-Vis absorbance measurement, increments dye absorbance is not linearly relates to the solar cell performance. The used of scattering layer is proven can increase the visible light path inside TiO₂ photoanode (sample B and C) and near infrared (NIR) for sample D, considered from absorbance spectra. Current-voltage measurement shows that C2 sample has a highest efficiency of 3.43%, which is use Ti-Nanooxide reflector as scattering layer with J_{sc} of 9.19%, V_{oc} of 0.69 volt. It can be concluded from these results that the suitable scattering layer for dssc is use Ti-nanooxide reflector.

Keywords: DSSC, scattering layer, absorbance, V_{oc}, J_{sc}

1. Pendahuluan

Sumber energi alternatif yang dapat diperbaharui telah banyak ditemukan seperti angin, biomass, air dan energi cahaya matahari yang dapat membantu mencegah krisis energi pada masa mendatang. Dari sekian banyak sumber energi alternatif yang ditemukan, energi cahaya matahari merupakan energi alternatif yang paling menarik untuk dikembangkan, hal ini dikarenakan jumlah energi cahaya matahari yang sampai ke bumi cukup besar. Salah satu pemanfaatan energi matahari adalah dengan mengubahnya menjadi energi listrik melalui divais yang dikenal dengan sel surya.

Sel surya yang berhasil dikembangkan pada generasi pertama yaitu sel surya yang menggunakan bahan silikon kristal tunggal dan sel surya yang menggunakan wafer silikon polikristalin. Sel surya

[†] email : wdsukmawati@uho.ac.id

ini memiliki efisiensi yang sangat tinggi namun biaya fabrikasinya sangat besar serta proses fabrikasinya yang membutuhkan teknologi yang rumit dan temperatur yang sangat tinggi sehingga membatasi pengembangannya dalam jangka panjang. Generasi kedua yaitu sel surya yang dibuat dengan lapisan tipis salah satunya adalah sel surya yang dibuat menggunakan Cadmium Telluride (CdTe). Efisiensi dari sel surya jenis ini juga cukup baik, akan tetapi penggunaan logam berat Cadmium dapat menimbulkan polusi yang sangat membahayakan bagi lingkungan. Sel surya generasi ketiga yaitu sel surya dari bahan polimer atau biasa disebut sel surya organik, sel surya fotoelektrokimia dan sel surya tersensitisasi dye (*dye-sensitized solar cells/DSSC*). Sel surya generasi ketiga ini dapat dibuat dengan metode yang sederhana, tidak membutuhkan ruang vakum dan proses deposisi logam, material pembuatnya yang tergolong murah serta telah dapat mencapai efisiensi yang cukup tinggi ~7,1% sejak pertama kali ditemukan. Sejak saat itu penelitian tentang DSSC telah berkembang hingga sekarang. Efisiensi yang diperoleh tercatat 10,4% [1], 11,1% [2] dan terbaru DSSC berbasis elektrolit cair telah mencapai efisiensi sebesar 13% [3], hampir mendekati nilai efisiensi realistis secara komersial.

DSSC adalah jenis sel surya yang tersusun dari empat komponen utama yaitu foto-elektroda atau elektroda kerja, material penyerap cahaya (*dye*), elektroda pengumpul (*counter electrode*) dan larutan elektrolit. Foto-elektroda umumnya terbuat dari bahan semikonduktor seperti TiO_2 dan ZnO . Beberapa peneliti telah melakukan pengembangan dalam rangka mengoptimasi kegunaan TiO_2 sebagai lapisan foto-elektroda diantaranya adalah penggunaan TiO_2 dengan lapisan pasivasi yang lebih rendah (rutile/rutile dicampur dengan TiO_2) dan lapisan atasnya menggunakan film TiO_2 anatase seperti yang dilakukan oleh Yu dkk., (2009) yang membandingkan efisiensi antara sel DSSC yang menggunakan dan yang tidak menggunakan lapisan pasivasi diperoleh efisiensi masing-masing 7,6% dan 5,7% [4]. Ditemukan bahwa lapisan TiO_2 yang padat tidak hanya berperan sebagai lapisan pelindung terhadap penetrasi ionik tetapi juga menimbulkan struktur mikro yang berbeda di dalam elektroda TiO_2 dari proses sol-gel yang pada akhirnya menyebabkan perbedaan jumlah dye yang diserap pada permukaan TiO_2 . Metode lain yang dikembangkan oleh beberapa peneliti dalam memodifikasi lapisan TiO_2 yaitu menggunakan partikel TiO_2 *scattering* (dalam bentuk film atau dicampur dengan partikel-partikel nanokristal). Lapisan/partikel *scattering* ini akan membantu untuk membangun lapisan film TiO_2 nanokristalin yang sangat tipis dengan luas permukaan yang tinggi yang akan mengurangi penggunaan dye tanpa mengorbankan efisiensi sel. Kim dkk., (2008) melaporkan peningkatan efisiensi dari 5,77% menjadi 7,48% dari sel DSSC diberikan tambahan lapisan *scattering* dari partikel TiO_2 berukuran 300 nm [5]. Beberapa jenis metal oksida yang lain juga telah diinvestigasi untuk digunakan sebagai lapisan *scattering* pada bagian atas film TiO_2 seperti ZrO_2 (5,8%), Al_2O_3 (7,3%), TiO_2 dalam bentuk rutile, dan ZnO (2,58%). Penggunaan lapisan *scattering* yang sifat lapisannya berwarna buram (*opaque*) mempunyai beberapa keuntungan diantaranya meningkatkan performa DSSC, dengan meminimalisasi rekombinasi elektron dan hole dalam meningkatkan resistansi permukaan TiO_2 dan menunda proses back elektron transfer menuju elektrolit, dan meningkatkan penyerapan dye sehubungan dengan meningkatnya area permukaan yang pada akhirnya menghasilkan efisiensi yang tinggi [6]. Selain itu juga, penggunaan lapisan *scattering* akan memperpanjang jarak lintasan cahaya di dalam sel, karena cahaya yang masuk akan terpantul kembali setelah sampai ke permukaan lapisan TiO_2 *scattering*. Akibatnya, foton akan terperangkap lebih lama di dalam sel dan meningkatkan peluang foton dikonversi menjadi arus listrik.

Berdasarkan uraian di atas, penulis mencoba memvariasikan lapisan *scattering* menggunakan Tinanooxide microchannel, Ti-nanooxide reflektor dan ZnO nanopartikel di atas permukaan lapisan TiO_2 transparan dan pengaruhnya terhadap performa kerja sel surya yang dihasilkan.

2. Eksperimen

2.1 Fabrikasi Sel Surya

Substrat konduktif FTO dicuci dengan air dan sabun tepol kemudian dibilas dengan aquades dan etanol teknis, setelah itu dikeringkan menggunakan *hair dryer*. Substrat FTO yang sudah kering

kemudian ditempatkan pada wadah yang berisi isopropanol dan aseton dengan perbandingan volume 1:1, selanjutnya wadah tersebut ditempatkan pada *ultrasonic bath* selama 15 menit dengan daya 50 Watt, setelah itu substrat FTO di cuci kembali dengan aquades dan etanol teknis lalu dikeringkan menggunakan *hair dryer*, dilanjutkan dengan proses pretreatment. Deposisi lapisan tipis pasta TiO₂ Transparan (produk dari Solaronix) menggunakan teknik *screen printing* dengan ukuran mesh 90T, yang dibuat sebanyak 4 lapis diakhiri dengan pemanasan di atas *hot plate* dengan suhu 80°C selama 6 menit, dan dinaikkan secara gradual hingga mencapai suhu 500°C. Lapisan *scattering* yang digunakan adalah ZnO nanopartikel+10wt% ethyl selulosa, *Ti-nanooxide microchannel*, dan *Ti-nanooxide* reflektor dalam bentuk pasta. Lapisan *scattering* divariasikan ketebalannya berupa variasi jumlah pelapisan dari 1 hingga 3 kali yang dideposisikan menggunakan teknik *screen printing* dengan ukuran mesh 90T. Dye yang digunakan adalah dye N719 (solaronix) yang dilarutkan 4 ml etanol p.a dengan konsentrasi 0.7mM. Elektroda kerja TiO₂ kemudian direndam dalam wadah yang berisi larutan dye N719 selama 24 jam. Substrat elektroda kerja dan substrat elektroda lawan disatukan dengan menggunakan *film surlyn* dengan bantuan *hot press* dengan suhu $\pm 120^\circ\text{C}$. Sebelum digunakan, elektroda lawan yang berupa substrat kaca FTO yang dilapisi platina terlebih dahulu dibersihkan dengan etanol teknis. Elektrolit diinjeksikan ke dalam ruang diantara kedua substrat elektroda melalui lubang kecil pada bagian atas elektroda lawan dengan menggunakan teknik vakum.

2.2 Spektroskopi UV-Vis

Karakterisasi sifat optik berupa pengukuran absorbansi dari sel dengan menggunakan UV-Vis Spektrometer. Hasil pengukuran absorbansi akan menentukan seberapa besar kemampuan dye untuk terabsorpsi ke dalam sel aktif TiO₂.

2.3 Karakterisasi Fotovoltaik

Fungsi kerja sel DSSC diukur menggunakan perangkat *solar simulator Oriel Newport AM 1.5* (100 mW/cm²) yang terintegrasi dengan peralatan *Keithley* dan perangkat lunak *Lab View*. Data yang diperoleh berupa data I-V yang kemudian dianalisis dengan perhitungan menggunakan persamaan

$$FF = \frac{V_{max} \cdot J_{max}}{V_{oc} \cdot J_{sc}} \quad (1.1)$$

$$\eta = \frac{V_{max} \cdot J_{max}}{P_{in}} = \frac{V_{oc} \cdot J_{sc} \cdot FF}{P_{in}} \quad (1.2)$$

dimana J_{sc} adalah rapat arus rangkaian pendek, V_{oc} adalah tegangan rangkaian terbuka, FF adalah faktor pengisian (*Fill factor*) sel surya, P_{in} adalah daya yang masuk yaitu 100 mW/cm².

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Hasil Karakterisasi UV-Vis

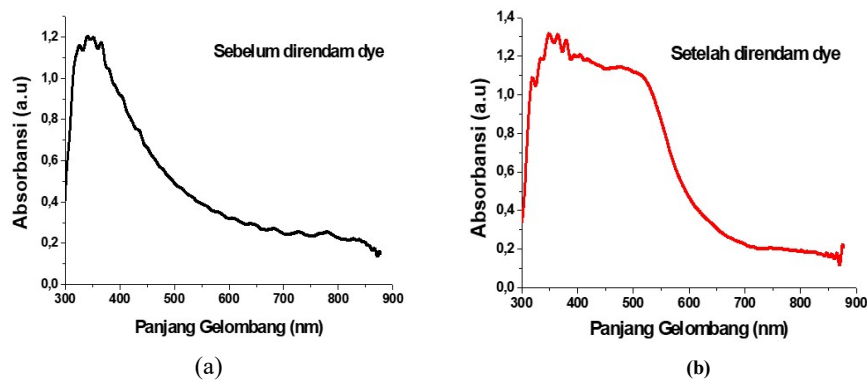
Penamaan sampel yang berkaitan dengan variasi lapisan *scattering*, ditabulasikan pada tabel 1 berikut.

Tabel 1. Jenis sampel yang digunakan pada penelitian ini

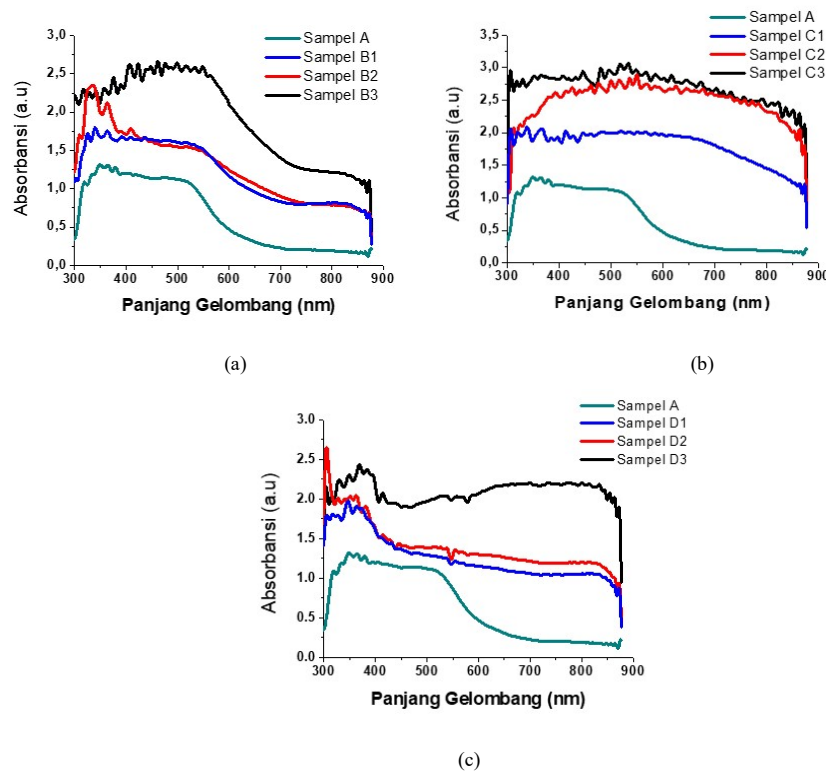
Nama Sampel	Jumlah Lapisan TiO ₂ Transparan	Jenis Lapisan Scattering	Jumlah Pelapisan lapisan scattering	Ketebalan Lapisan (μm)
A	4	Tanpa Lapisan Scattering	0	12
B1	4	Ti-Nanooxide Microchannel	1	24
B2	4	Ti-Nanooxide Microchannel	2	28
B3	4	Ti-Nanooxide Microchannel	3	33
C1	4	Ti-Nanooxide reflector	1	20
C2	4	Ti-Nanooxide reflector	2	22
C3	4	Ti-Nanooxide reflector	3	25
D1	4	ZnO Nanopartikel + 10 wt% ethyl selulosa	1	20
D2	4	ZnO Nanopartikel + 10 wt% ethyl selulosa	2	27
D3	4	ZnO Nanopartikel + 10 wt% ethyl selulosa	3	29

Karakterisasi dengan UV-Vis dilakukan untuk melihat apakah penggunaan lapisan scattering yang berbeda akan berpengaruh terhadap serapan *dye*, dalam hal ini *dye* yang digunakan adalah *dye* tipe N719. Absorbansi dilakukan sebelum sampel direndam pada larutan *dye* dan setelah di rendam larutan *dye*. Pengamatan spektrum absorbansi mulai dari rentang panjang gelombang 300 nm sampai dengan 900 nm menggunakan *Spectrometer Ocean Optik 2000*.

Hasil karakterisasi yang diperoleh untuk sampel A sebelum dan sesudah direndam pada larutan dye ditampilkan pada Gambar 1. Terdapat perbedaan karakteristik spektrum absorbansi dari keduanya. Pada gambar 4.2(a) nampak terdeteksi daerah penyerapan untuk TiO₂ dengan puncak berada pada panjang gelombang 350 nm, setelah TiO₂ tersebut direndam dengan *dye* (gambar 4.2(b)) kemudian muncul daerah penyerapan yang baru, dimana puncaknya berada pada panjang gelombang 550 nm. Puncak ini berkaitan dengan puncak penyerapan oleh *dye* N719. Hasil ini mengkonfirmasi telah terjadinya proses penyerapan *dye* didalam lapisan TiO₂.

Gambar 1. Spektrum absorbansi sampel A sebelum direndam *dye* (a) dan setelah direndam *dye* (b)

Untuk mengkonfirmasi apakah penggunaan lapisan scattering dapat mengurung cahaya lebih lama didalam lapisan TiO₂ sehingga memperpanjang lintasan cahaya maka pada Gambar 2 ditampilkan perbandingan spektrum absorbansi antara sampel A, B, C dan D, dengan variasi jumlah pelapisan.



Gambar 2. Spektrum absorpsi (a) Menggunakan *Ti-nanooxide microchannel* (b) Menggunakan *Ti-nanooxide reflector* dan (c) Menggunakan ZnO nanopartikel + 10 wt% ethyl selulosa

Pada Gambar 2 terlihat bahwa semakin banyak lapisan *scattering* yang digunakan maka pengaruhnya terhadap cahaya yang dihamburkan (efek *scattering* nya) semakin besar. Hal ini terlihat pada bagian ekor (*tail*) spektrum absorpsi yang dihasilkan untuk semua sampel, jika dibandingkan dengan sampel TiO_2 tanpa lapisan *scattering*. Pada Gambar 2(a) (sampel B) terlihat bahwa penggunaan material *Ti-nanooxide microchannel* nampaknya tidak terlalu berpengaruh terhadap perubahan bentuk spektrum absorpsi, dimana bentuk spektrum nya masih menyerupai bentuk spektrum lapisan TiO_2 tanpa *scattering* (sampel A) dimana daerah penyerapannya mulai mengalami peluruhan pada panjang gelombang 520 nm. Perbedaan bentuk spektrum sampel B1, B2, dan B3 hanya terletak pada posisi *baseline* ujung spektrum absorpsi.

Pada gambar 2(b), penggunaan lapisan *Ti-nanooxide reflector* memberikan pengaruh yang signifikan terhadap perubahan bentuk absorpsinya dimana daerah penyerapannya menjadi lebih panjang hingga ke daerah panjang gelombang 650 nm sebelum kemudian meluruh. Perbedaan *baseline* pada sampel C1, C2, dan C3 juga disebabkan oleh efek hamburan cahaya dimana semakin tebal lapisan *scattering* yang digunakan maka efek hamburannya juga semakin besar.

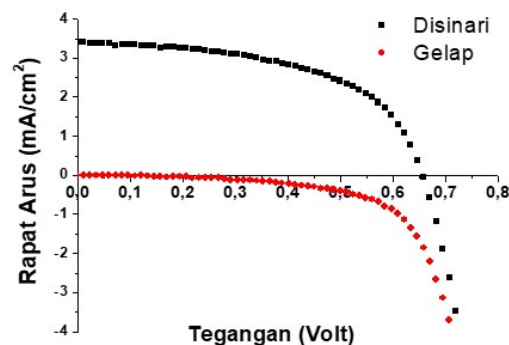
Pada gambar 2(c) penggunaan lapisan ZnO nanopartikel + ethyl selulosa 10 wt% juga memperpanjang daerah penyerapan cahaya yang pengaruhnya sebenarnya lebih baik dari penggunaan lapisan *Ti-nanooxide reflector* dimana rentang daerah penyerapannya hingga memasuki

daerah *Near Infrared* (NIR) pada panjang gelombang 820 nm sebelum kemudian meluruh. akan tetapi, nampaknya penggunaan lapisan ZnO nanopartikel + 10wt% ethyl selulosa menyebabkan puncak penyerapan *dye* N719 yang seharusnya berada pada panjang gelombang 500nm menjadi hilang, hal ini disebabkan karena sifat keasaman dari *dye* N719 yang ketika bereaksi dengan ZnO akan membentuk Zn^{2+} kompleks dengan ligan dari *dye*, reaksi ini merupakan reaksi kimia yang tidak diinginkan karena dapat merusak permukaan ZnO dan menghalangi pemisahan muatan [7]. Molekul-molekul *dye* yang membentuk pasangan kompleks tidak akan dapat menginjeksikan elektron ke pita konduksi TiO_2 , dimana hal ini kemudian akan berpengaruh pada nilai rapat arus sel surya yang dihasilkan, yang akan ditampilkan pada pembahasan selanjutnya.

Dari Gambar 2 di atas dapat dilihat bahwa absorbansi terbesar diperoleh pada sampel dengan tiga kali pelapisan (B3, C3, dan D3). Hal ini terjadi karena semakin tebal lapisan TiO_2 maka semakin banyak molekul-molekul *dye* yang dapat berikatan dengan TiO_2 , sehingga lebih banyak cahaya yang dapat di serap oleh *dye*.

3.2 Karakteristik Fotovoltaik

Berikut ini ditampilkan kurva hubungan rapat arus dan tegangan sel surya DSSC dengan variasi tanpa lapisan scattering dalam kondisi gelap atau tidak disinari dan disinari.

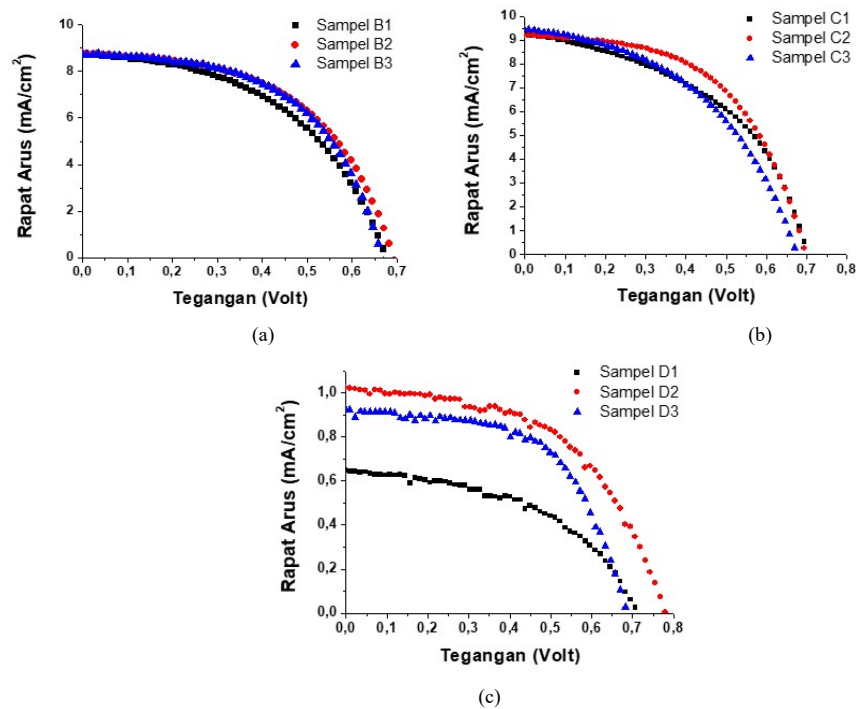


Gambar 3. Kurva J-V sampel A yang diukur dalam kondisi gelap dan kondisi disinari dengan intensitas cahaya 100 mW/cm².

Gambar 4 menampilkan kurva hubungan J-V hasil pengukuran sel dengan variasi lapisan scattering dan variasi jumlah pelapisan lapisan scattering. Pada Gambar 4(a) untuk sampel B1, B2, dan B3, nilai rapat arus (J_{sc}) nya tidak terlalu mengalami perubahan yang signifikan yaitu 8,75 mA/cm², 8,87 mA/cm² dan 8,72 mA/cm² untuk sampel B1, B2, dan B3 secara berurutan. Adapun nilai tegangan rangkaian terbuka (V_{oc}) nya awalnya mengalami peningkatan dengan bertambahnya ketebalan lapisan *scattering* dari B1 ke B2, akan tetapi peningkatan ketebalan lebih lanjut (B3) kemudian menyebabkan penurunan pada nilai V_{oc} nya.

Pada Gambar 4(b) untuk sel DSSC yang menggunakan *Ti-nanooxide reflector*, nilai rapat arus untuk sampel C1 dan C2 sama yaitu 9,19 mA/cm² dan kemudian meningkat menjadi 9,44 mA/cm² dengan bertambahnya ketebalan lapisan *scattering* (sampel C3), akan tetapi nilai V_{oc} nya menurun dari 0,69 Volt untuk sampel C1 dan C2 menjadi 0,67 V untuk sampel C3. Nilai efisiensi terbesar untuk sel DSSC yang menggunakan *Ti-nanooxide reflector* diperoleh pada sampel dengan dua kali pelapisan lapisan *scattering* dengan ketebalan total 22 μm . Dari Gambar 4(c) untuk sampel dengan variasi

ketebalan lapisan *scattering* menggunakan ZnO nanopartikel + 10wt% ethyl selulosa (Sampel D1, D2, dan D3) diperoleh bahwa nilai J_{sc} dan V_{oc} yang terbesar diperoleh pada sampel dengan dua kali pelapisan (ketebalannya 27 μm) yaitu 1,02 mA/cm^2 dan 0,78 V.



Gambar 4. Kurva J-V yang diukur dalam kondisi disinari dengan variasi lapisan *scattering* (a) menggunakan *Ti-nanooxide microchannel* (b) menggunakan *Ti-nanooxide reflector* (c) menggunakan ZnO nanopartikel + 10wt% ethyl selulosa.

Dari keseluruhan sampel, nilai V_{oc} terbesar diperoleh pada sampel D2, sedangkan nilai J_{sc} terbesar diperoleh pada sampel C3. Akan tetapi, secara keseluruhan nilai efisiensi tertinggi diperoleh pada sampel dengan dua kali pelapisan (B2, C2, dan E2). Hasil tabulasi parameter-parameter fotovoltaik sel DSSC dengan variasi lapisan *scattering* ditampilkan pada Tabel 2 berikut.

Tabel 2. Tabulasi parameter-parameter kerja sel surya DSSC dengan variasi lapisan *scattering*.

Nama Sampel	J_{sc} mA/cm^2	V_{oc} (volt)	FF (%)	η (%)
A	3,4	0,65	54,69	1,2
B1	8,75	0,67	48,52	2,84
B2	8,87	0,68	52,85	3,16
B3	8,72	0,65	54,69	3,13
C1	9,19	0,69	47,73	3,04
C2	9,19	0,69	53,81	3,43
C3	9,44	0,67	39,95	2,52
D1	0,64	0,71	48,5	0,22
D2	1,02	0,78	52,73	0,42
D3	0,92	0,68	58,34	0,37

Dari hasil penelitian yang telah dilakukan, nilai efisiensi yang diperoleh meningkat dengan bertambahnya jumlah pelapisan lapisan *scattering* (Sampel B1 ke B2, sampel C1 ke C2, dan sampel

D1 ke D2). Hal ini berkaitan dengan meningkatnya jumlah *dye* yang berikatan dengan TiO_2 dengan meningkatnya ketebalan sel sehingga pada akhirnya meningkatkan jumlah cahaya yang diserap oleh *dye*. Akan tetapi ketika ketebalan lapisan *scattering* (sampel B3, C3, dan D3) ditambah, efisiensinya malah mengalami penurunan, hal ini dapat dikaitkan dengan kemampuan elektrolit untuk berpenetrasi kedalam lapisan TiO_2 , semakin tebal lapisan TiO_2 maka elektrolit akan semakin sulit untuk masuk ke dalam pori-pori TiO_2 sehingga elektrolit tidak dapat menjalankan fungsinya untuk meregenerasi kembali *dye* yang berada dalam keadaan teroksidasi (kehilangan elektron), akibatnya tidak dapat terbentuk kembali pasangan eksiton pada pita valensi *dye* sehingga tidak ada elektron yang dapat dieksitasikan menuju ke pita konduksi *dye* untuk selanjutnya diinjeksikan ke pita konduksi TiO_2 dan berdifusi di dalam lapisan TiO_2 tersebut sehingga terbaca sebagai arus pada rangkaian luar. Disamping itu, jika lapisan TiO_2 juga terlalu tipis maka akan mengurangi jumlah molekul *dye* yang dapat berikatan dengan TiO_2 sehingga mengurangi jumlah foton yang dapat di serap untuk selanjutnya di ubah menjadi arus listrik. Oleh karena itu, efisiensi sel DSSC untuk sampel B1, C1, dan D1 juga lebih kecil. Dari hasil penelitian ini, diperoleh bahwa efisiensi terbesar diperoleh pada sampel dengan dua kali pelapisan yaitu B2, C2, dan D2.

4. Simpulan

Berdasarkan hasil pengukuran spektrum absorbansi diketahui bahwa semakin besar jumlah pelapisan lapisan *scattering* maka absorbansi yang dihasilkan juga semakin besar. Efek pengurangan cahaya yang maksimum di dalam sel ditunjukkan oleh sel DSSC yang menggunakan ZnO nanopartikel + 10wt% ethyl selulosa yang ditunjukkan dengan perpanjangan daerah penyerapan hingga ke daerah Near Infrared (NIR). Penggunaan Ti-nanooxide reflector dan Ti-nanooxide microchannel sebagai lapisan *scattering* menghasilkan efisiensi sel DSSC yang lebih baik dibandingkan ZnO nanopartikel + Ethyl Selulosa. Efisiensi terbaik sebesar 3,43% diperoleh pada sampel dengan dua kali pelapisan menggunakan Ti-nanooxide reflektor.

Daftar Pustaka

1. Nazeeruddin, M. K., Kay, A., Rodicio, L., Humphry-Baker, R., Muller, E., Liska, P., Vlachopolous, N., Gratzel, M., 1993. *Conversion of Light to Electricity by Cis-X₂Bis(2,2'-bipyridyl-4,4'-dicarboxylate)ruthenium(II) Charge Transfer Sensitizers (X = Cl, Br, I, CN, and SCN) on Nanocrystalline TiO₂ Electrodes*, J. Am. Chem. Soc., **115**, 6382-6390
2. O'Regan, B., Gratzel, M., 1991, *A Low-Cost, High-Efficiency Solar Cell based on Dye-Sensitized Colloidal TiO₂ Films*, Nature, **335**, 737-740.
3. Mathew, S., Yella, A., Gao, P., Humphry-Baker, R., Curchod, B. F. E., Ashari-Astani, N., Tavernelli, I., Rothlisberger, U., Nazeeruddin, M. K., Gratzel, M., 2014. *Dye-Sensitized Solar Cells With 13% Efficiency Achieved Through The Molecular Engineering of Porphyrin Sensitizers*, Nature Chemistry, **6**, 242-247.
4. Yu, Hua, Zhang, Shanqing, Zhao, Huijun, Will, Geoffrey, Liu, Porun, 2009. *An Efficient and Low Cost TiO₂ Compact Layer for Performance Improvement of Dye-Sensitized Solar Cells*, Electrochim. Acta, **54**, 4, 1319-1324.
5. Kim, Yoon, H. L., Mi, H. L., 2008. *Formation of Efficient Dye-Sensitized Solar Cells by Introducing an Interfacial Layer of Long-Range Ordered Mesoporous TiO₂ Thin Film*, Langmuir, **24**, 22, 13225-13230.
6. Jung dkk., 2005. *Preparation of Nanoporous MgO-Coated TiO₂ Nanoparticles and Their Application to The Electrode of Dye Sensitized Solar Cells*, Langmuir, **21**, 23, 10332-10335.
7. Juan A. Anta, Guillen E., Tena-Zaera R., 2012. *ZnO-Based Dye-Sensitized Solar Cells*, J. Phys. Chem. C., **116**, 11413-11425.

PENGEMBANGAN DAN MODIFIKASI SISTEM PENGUKURAN SUSEPTIBILITAS DAN PERMEABILITAS BAHAN MAGNET

YATI MARYATI[†], HERLAN RUDIYANTO, ANNISA APRILIA, TOGAR SARAGI

*Departemen Fisika,
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Padjadjaran
Jl. Raya Bandung-Sumedang Km 21, Jatinangor 45363*

Abstrak. Telah dilakukan pengukuran suseptibilitas dan permeabilitas bahan menggunakan prinsip resonansi pada rangkaian RLC dengan solenoida sebagai induktor. Beberapa faktor yang mempengaruhi kuat induksi magnetik solenoida meliputi arus listrik, panjang solenoida, jumlah lilitan dan bahan yang disisipkan ke dalam bagian dalam solenoida. Pada penelitian ini dilakukan modifikasi kumparan solenoida untuk mengetahui pengaruh jenis kumparan terhadap respon medan magnet yang dihasilkan. Kumparan solenoida yang digunakan memiliki jumlah lilitan $N = 500$ dan 1000 . Bahan sisipan yang digunakan pada penelitian ini adalah besi, aluminium dan tembaga. Hasil pengukuran dengan modifikasi solenoida menunjukkan kesesuaian dengan teori yang ada.

Kata kunci : induksi, solenoida, permitifitas, suseptibilitas

Abstract. *Susceptibility and permeability has been measured using the principle of resonance in the RLC circuit with solenoid as an inductor. Several factors that influence the magnetic induction of solenoids are electric current, solenoid length, number of turns and materials. In this study solenoid was modified to determine the effect of the type of coil on the magnetic field response. The number of turns of solenoid was $N = 500$ and 1000 . The inserts used in this study are iron, aluminium and copper. The measurement result with solenoid modification shows compatibility with existing theories.*

Keywords: induction, solenoid, permittivity, susceptibility

1. Pendahuluan

Percobaan dalam bidang Fisika Material dirancang khusus untuk mahasiswa Fisika yang akan mengambil Tugas Akhir di bidang peminatan Fisika Material. Praktikum ini berkaitan erat dengan mata kuliah pilihan di bidang peminatan material salah satunya adalah mata kuliah Bahan Magnet dan Superkonduktor. Tujuan dari Praktikum Fisika Material adalah memberikan pengalaman secara komprehensif kepada mahasiswa yang akan mengambil tugas akhir di bidang peminatan Material. Di dalam praktikum tersebut mahasiswa dilatih untuk merencanakan, mempersiapkan dan melaksanakan kegiatan eksperimen serta melakukan pengukuran [1].

Bahan magnet memiliki suseptibilitas dan permeabilitas yang dapat diketahui melalui pengukuran. Pengukuran susceptibilitas dan permeabilitas bahan magnet ini dilakukan dengan menggunakan rangkaian RLC [2-6]. Solenoida adalah induktor yang terdiri gulungan kawat yang didalamnya dimasukkan batang besi berbentuk silinder dengan tujuan memperkuat medan magnet yang dihasilkan, medan magnet ini disebut induksi magnet. Pada penelitian ini dilakukan modifikasi kumparan solenoida untuk mengetahui pengaruh jenis kumparan terhadap respon medan magnet yang dihasilkan.

[†] Email : yatimaryati26@gmail.com

2. Eksperimen

Percobaan dilakukan dengan variasi jumlah lilitan, nilai kapasitor dan jenis material. Jumlah lilitan yang digunakan adalah $N = 500$ dan 1000 lilitan, kapasitor adalah $C = 33\mu\text{F}$ dan 68nF , serta jenis bahan adalah besi, aluminium dan tembaga. Pengukuran dilakukan dengan mengamati besar frekuensi resonansi yang dihasilkan dengan variasi jumlah lilitan, kapasitor dan jenis bahan. Percobaan dilakukan dengan menggunakan rangkaian RLC dengan nilai-nilai komponen dan ukuran kumparan solenoida seperti terlihat pada tabel 1.

Tabel 1. Nilai komponen resistor dan kapasitor serta ukuran kumparan solenoida.

Komponen	Nilai
Panjang (l)	0.035 m
Jumlah lilitan (N)	500 dan 1000
Luas (A)	0.0004 m ²
Kapasitor (C)	33 μF dan 68nF
Resistor (R)	56 k Ω

Hasil pengukuran kemudian dihitung dengan Persamaan (1) (2) dan (3) untuk menentukan nilai suseptibilitas (χ) dan permeabilitas (μ):

$$L = \frac{1}{4\pi^2 C f^2} \quad (2.1)$$

$$\mu = \frac{L l}{N^2 A} \quad (2.2)$$

$$\chi = \mu_r - 1 \quad (2.3)$$

Dengan, L = induktansi (H),
 C = nilai kapasitor (F)
 f = frekuensi (Hz)

3. Hasil dan Pembahasan

Tabel 2 menunjukkan hasil pengukuran frekuensi resonansi dari beberapa bahan dengan variasi jumlah lilitan dan kapasitor yang digunakan. Pada percobaan dengan jumlah lilitan 500 dan nilai kapasitor sama dihasilkan frekuensi resonansi dua kali lebih besar dibandingkan dengan percobaan menggunakan jumlah lilitan 1000. Dengan menggunakan Persamaan (1), (2) dan (3) didapat nilai permeabilitas dan suseptibilitas bahan magnet yang ditunjukkan pada Tabel 3 dan 4.

Pada percobaan dengan jumlah lilitan 500 dan kapasitor $C = 68\text{ nF}$ dan $33\mu\text{F}$ menunjukkan hasil perhitungan permeabilitas dan suseptibilitas yang sama. Sedangkan untuk percobaan dengan jumlah lilitan 1000 dan kapasitor $C = 68\text{ nF}$ dan $33\mu\text{F}$ menunjukkan hasil perhitungan permeabilitas dan suseptibilitas yang sedikit berbeda, akan tetapi sifat kemagnetan yang sama.

Tabel 2. Nilai frekuensi resonansi hasil pengukuran.

Bahan	N = 500		N = 1000	
	C = 68 nF	C = 33 μ F	C = 68 nF	C = 33 μ F
	F _{res} (Hertz)	F _{res} (Hertz)	F _{res} (Hertz)	F _{res} (Hertz)
Besi	150	30	80	20
Aluminium	8000	1200	4000	600
Tembaga	10000	1500	5000	800

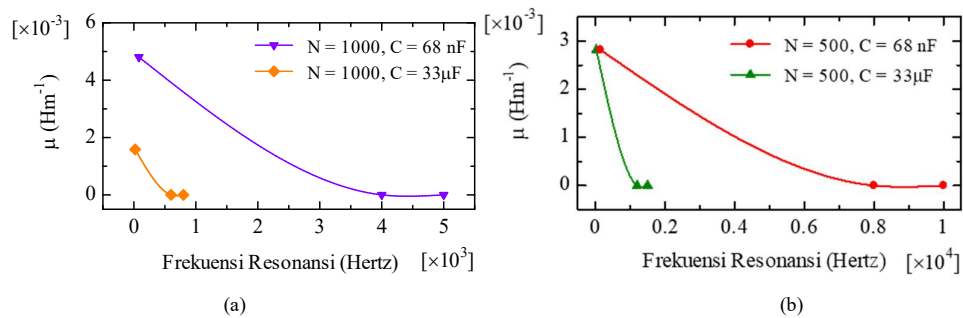
Tabel 3. Hasil perhitungan permeabilitas dan suseptibilitas dengan jumlah lilitan 500.

Bahan	C = 68 nF		C = 33 μ F	
	μ (Hm ⁻¹)	χ	μ (Hm ⁻¹)	χ
Besi	0.002817	2234.979	0.002817	2234.979
Aluminium	1.76E-06	0.397487	1.76E-06	0.397487
Tembaga	1.13E-06	-0.105609	1.13E-06	-0.105609

Tabel 4. Hasil perhitungan permeabilitas dan suseptibilitas dengan jumlah lilitan 1000.

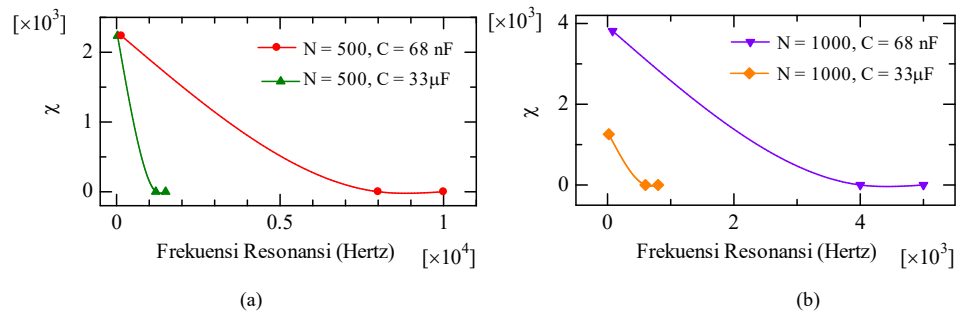
Bahan	C = 68 nF		C = 33 μ F	
	μ (Hm ⁻¹)	χ	μ (Hm ⁻¹)	χ
Besi	0.0048067	3813.8304	0.0015847	1256.738
Aluminium	1.923E-06	0.5259321	1.761E-06	0.397487
Tembaga	1.231E-06	-0.023403	9.905E-07	-0.213914

Gambar 1 menunjukkan hubungan frekuensi resonansi terhadap permeabilitas bahan dengan jumlah lilitan N = 500 dan 1000 dan kapasitor C = 68 nF dan 33 μ F. Gambar 2 menunjukkan hubungan frekuensi resonansi terhadap suseptibilitas bahan dengan jumlah lilitan N = 500 dan 1000 dan kapasitor C = 68 nF dan 33 μ F.


Gambar 1. Nilai Permeabilitas dengan jumlah lilitan (a) 500 dan (b) 1000.

Gambar 1(a) menunjukkan bahwa dengan nilai kapasitor yang berbeda dihasilkan frekuensi resonansi yang berbeda pula, akan tetapi nilai permeabilitas yang dihasilkan tetap sama pada setiap bahan. Pada Gambar 1(b) terdapat sedikit perbedaan pada nilai permeabilitas yang dihasilkan, akan

tetapi sifat bahan yang didapat tetap sama. Hal di atas berbanding lurus dengan nilai suseptibilitas yang dihasilkan, ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Nilai Suseptibilitas dengan jumlah lilitan (a) 500 dan (b) 1000.

4. Simpulan

Telah dilakukan pengukuran suseptibilitas dan permeabilitas bahan menggunakan prinsip resonansi pada rangkaian RLC dengan solenoida sebagai induktor. Hasil pengukuran dengan modifikasi solenoida menunjukkan bahwa tembaga merupakan bahan diamagnetik, aluminium termasuk bahan paramagnetik dan besi termasuk bahan ferromagnetik.

Daftar Pustaka

1. Fitrilawati. 2017. Modul Praktikum Fisika Material 2. UNPAD
2. Sutrisno. 1987. Elektronika 2 Teori dan Penerapannya. Penerbit ITB, Bandung.
3. Giancoli, D.C. 1998. Fisika jilid 2. Terjemahan Dra. Yuhilza Hanum, M.Eng dan Ir. Irwan Arifin, M.Eng. Penerbit Erlangga, Jakarta
4. Halliday, D. dan Resnick, R. 1998. Fisika Cetakan Ketiga. Terjemahan. Penerbit Erlangga, Jakarta.
5. Reitz, J.R., Milford, F.J., Christy, R.W. 1992. Foundation of Electromagnetic Theory. Penerbit, Addison-wesley publishing company, Inc
6. Tipler, P.A. 1996, "Fisika Untuk Saint dan Teknik" Jilid 2, Edisi ketiga, Penerbit Erlangga, Jakarta.

PENGARUH KONSENTRASI BRIKET CAMPURAN SEKAM PADI DAN SERUTAN KAYU ALBASIA TERHADAP EMISI KARBON MONOKSIDA DAN LAJU PEMBAKARAN

ANNISA NURFITRI SARI, OTONG NURHILAL, SRI SURYANINGSIH[†]

*Departemen Fisika,
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Padjadjaran
Jl. Raya Bandung-Sumedang Km 21, Jatinangor 45363*

Abstrak. Biomassa merupakan salah satu sumber energi yang dapat dijadikan sebagai bahan bakar alternatif karena memiliki molekul hidrokarbon. Pada penelitian ini, dilakukan pengolahan biomassa menjadi briket. Biomassa yang digunakan penelitian ini berasal dari limbah pertanian yaitu sekam padi dengan penambahan serutan kayu albasia guna meningkatkan nilai kalor yang dihasilkan. Dalam penggunaannya, briket melalui proses pembakaran akan mengemisi gas karbon monoksida yang memiliki banyak dampak negatif. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh konsentrasi briket campuran sekam padi dan serutan kayu albasia terhadap emisi karbon monoksida dan laju pembakarannya. Hasil pengujian kadar karbon monoksida terendah sebesar 650,12 ppm, yaitu sampel briket campuran dengan konsentrasi 50:50 ukuran 60 mesh. Hal ini menunjukkan bahwa semakin sedikit konsentrasi sekam padi maka akan semakin rendah kadar karbon monoksidanya. Hasil Pengujian laju pembakaran tercepat diperoleh sebesar 0,5595 gram/menit, yaitu pada briket campuran dengan konsentrasi 50:50 dan ukuran 100 mesh. Sedangkan laju pembakaran terendah diperoleh sebesar 0,3778 gram/menit, yaitu pada sampel briket campuran dengan konsentrasi 90:10 dan ukuran 60 mesh..

Kata kunci : briket, sekam padi, kayu albasia, karbon monoksida, laju pembakaran

Abstract. Biomass is an energy source that can be used as an alternative fuel due to hydrocarbon molecules. In this study, processing of biomass into solid form is carried out in the form of briquettes. The precursor of biomass are agricultural waste, namely rice husk with the addition of Albasia wood shavings to increase the calorific value produced. This research was conducted to determine the effect of the concentration of mixed rice husk briquettes and Albasia wood shavings on carbon monoxide emissions and their combustion rate. The lowest test results for carbon monoxide levels were 650.12 ppm in a mixture of 50:50 briquettes and 60 mesh sizes. It shows carbon monoxide will decrease by decreasing of rice husk. The results of the testing of the fastest combustion rate were obtained at 0.5595 grams/minute, which is on the mixture of briquettes with a concentration of 50:50 and the size of 100 mesh. While the lowest combustion rate was obtained at 0.3778 grams/minute, which is in the mixture of briquettes with a concentration of 90:10 and size of 60 mesh..

Keywords: briquette, rice husk, albasia wood, carbon monoxide, combustion rate

1. Pendahuluan

Penggunaan energi setiap negara meningkat sesuai dengan kebutuhan energi untuk masyarakat atau penduduk yang populasinya semakin meningkat. Konsumsi energi tertinggi masih didominasi oleh energi fosil yaitu mendekati angka 90%, namun diperkirakan persediaan bahan bakar fosil kian lama semakin habis [1]. Sehingga kelangkaan bahan bakar fosil akan menjadi suatu masalah yang cukup berdampak terhadap masyarakat. Saat ini telah dilakukan beberapa cara untuk mendapatkan energi pengganti dari energi fosil antara lain dari energi terbarukan. Salah satu sumber energi alternatif yang dapat digunakan untuk memenuhi kebutuhan tersebut adalah biomassa. Biomassa merupakan sumber daya terbarui yang bahannya dapat berasal dari tanaman baik secara langsung ataupun

[†] Email : sri@phys.unpad.ac.id

secara tidak langsung untuk dimanfaatkan sebagai energi [2]. Salah satu bentuk pengolahan biomassa sebagai bahan bakar yaitu briket. Beberapa sumber biomassa yang dapat digunakan yaitu sekam padi dan serutan kayu albasia. Briket berbahan baku sekam padi hanya memiliki nilai kalor yaitu 3300 kkal/kg [3]. Oleh karena itu diberi penambahan serutan kayu albasia yang memiliki nilai kalor lebih tinggi yaitu 4663,5 - 4916,6 kkal/kg [4]. Dalam penggunaannya, briket melalui proses pembakaran dimana dapat terjadi pembakaran sempurna atau pembakaran tidak sempurna. Pada pembakaran tidak sempurna akan menghasilkan emisi karbon monoksida, sehingga karbon pada bahan tidak berikatan seluruhnya dengan oksigen. Emisi gas ini memiliki dampak negatif baik untuk lingkungan dan kesehatan. Gas ini bersifat racun karena dapat berikatan dengan hemoglobin dalam darah membentuk karboksihemoglobin dimana menyebabkan tubuh kekurangan oksigen [5]. Semakin rendah kadar emisi karbon monoksida, maka semakin baik kualitas dari briket tersebut. Selain itu, briket juga harus memiliki laju pembakaran yang baik. Oleh karena itu tujuan dari penelitian ini yaitu mengetahui pengaruh variasi konsentrasi briket campuran sekam padi dan serutan kayu albasia terhadap emisi karbon monoksida yang dihasilkan dan mengetahui pengaruh variasi konsentrasi briket campuran sekam padi dan serutan kayu albasia terhadap laju pembakaran yang dihasilkan.

2. Eksperimen

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sekam padi, serutan kayu albasia, air dan tepung tapioka. Alat yang digunakan dalam penelitian ini antara lain *furnace*, drum karbonisasi, alat ukur suhu, blender, saringan ukuran 60 dan 100 mesh, alat cetak briket, kompor briket, kompor uji gas CO, dan CO meter.

Penelitian ini terdiri dari persiapan bahan, pembuatan briket dan pengujian briket. Persiapan bahan dimulai dengan pengeringan bahan sekam padi dan serutan kayu albasia secara alami selama 1 hari. Pembuatan briket dimulai dengan proses pirolisis (karbonisasi) untuk pengarangan bahan dilakukan pada suhu 233,96°C untuk sekam padi dan 300°C untuk serutan kayu albasia. Arang hasil karbonisasi disaring dengan ukuran 60 dan 100 mesh. Pencampuran bahan dilakukan dengan 6 variasi konsentrasi seperti pada Tabel 1.

Tabel 1. Variasi pencampuran bahan arang

Bahan	Konsentrasi (%)	Kode Sampel	Ukuran Partikel	Perekat
Sekam Padi : Serutan Kayu Albasia	100:0	A1	100 Mesh	7%
	90:10	A2		
	80:20	A3		
	70:30	A4		
	50:50	A5		
	0:100	A6		
	100:0	B1	60 Mesh	
	90:10	B2		
	80:20	B3		
	70:30	B4		
	50:50	B5		
	0:100	B6		

Perekat dari tepung tapioka yang digunakan sebesar 7%. Bahan-bahan yang telah dicampurkan dicetak berbentuk silinder dan dipadatkan dengan tekanan rata-rata 4,2 psi. Selanjutnya, dilakukan pengeringan briket secara alami selama 8 jam dan dengan oven pada suhu 50°C selama 4,5 jam. Massa rata-rata dari briket yang dihasilkan yaitu 73 gram dengan tinggi 9,5 cm. Pengujian karakteristik briket meliputi kadar zat terbang, karbon terikat dan nilai kalor dilakukan sesuai dengan metode *American Standard Testing and Material* (ASTM).

Pengujian emisi karbon monoksida (CO) dilakukan melalui proses pembakaran. Sebelum melakukan pembakaran, ditimbang terlebih dahulu massa briket yang akan diujikan. Selanjutnya memasukan briket ke dalam kompor khusus pengujian CO. Kompor uji CO terbuat berbentuk silinder dan dikelilingi dinding penghalang dengan tujuan pengukuran kadar CO lebih akurat. Diameter dari tabung silinder yaitu 11 cm dengan tinggi 11,5 cm. Tinggi dinding penghalang yaitu 30 cm.



Gambar 1. Alat Uji CO meter

Kadar emisi karbon monoksida dideteksi menggunakan alat uji CO meter seperti terlihat pada Gambar 1 dengan pencatatan data pada interval 3 menit sampai briket terbakar habis menjadi abu. Pengujian laju pembakaran dilakukan dengan cara membakar briket dan membiarkannya menyala pada kompor biobriket.



Gambar 2. Kompor Briket dan Anemometer dalam Pengujian Laju Pembakaran

Selama pembakaran, waktu dan perubahan suhu dicatat setiap 3 menit hingga briket terbakar habis menjadi abu. Pembakaran dilakukan dengan kecepatan aliran udara dalam kompor konstan yaitu 1,2 m/s. Laju pembakaran suatu briket dapat diketahui dengan mencatat massa briket sebelum dan sesudah proses pembakaran serta waktu yang dibutuhkan briket terbakar sampai menjadi abu.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Hasil Uji Karakterisasi Briket

Hasil pengujian karakteristik briket meliputi uji kadar air, kadar abu, zat terbang, dan karbon terikat dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Uji Kadar Air, Kadar Abu, Zat Terbang, Karbon Terikat, dan Nilai Kalor Briket.

Kode Sampel	Kadar Air (%)	Kadar Abu (%)	Kadar Zat Terbang (%)	Karbon terikat (%)	Nilai Kalor (kal/gram)
A1	6,28	38,54	16,04	39,14	3840
A2	6,39	36,10	16,84	40,67	3990
A3	6,88	33,22	18,22	41,68	4070
A4	7,28	30,19	19,52	43,01	4173
A5	7,93	24,29	22,01	45,88	4438
A6	9,73	10,04	29,48	50,75	4981
B1	6,53	39,98	16,43	38,06	3764
B2	6,71	36,10	17,32	39,87	3906
B3	7,32	30,23	20,62	41,83	4120
B4	6,88	33,31	19,20	40,61	4022
B5	8,02	24,52	22,76	44,70	4371
B6	9,84	9,62	29,83	50,71	4951

Pengujian kadar air dilakukan untuk mengetahui persentase kandungan air dalam briket. Berdasarkan Tabel 2, dapat dilihat bahwa kadar air pada briket dengan konsentrasi bahan 100 % sekam padi (kode sampel : A1 dan B1) lebih rendah apabila dibandingkan dengan briket berbahan 100% serutan kayu albasia (kode sampel : A6 dan B6) untuk kedua variasi ukuran partikel. Hal ini dikarenakan jumlah air yang terkandung pada serutan kayu albasia lebih besar dibandingkan dengan sekam padi. Semakin rendah kadar air yang dimiliki suatu briket, maka akan meningkatkan kualitas dari briket. Hal ini dikarenakan kadar air yang tinggi, akan menghambat proses penyalaan karena membutuhkan waktu lebih lama dibandingkan briket dengan kadar air yang rendah. Hasil pengujian menunjukan setiap penambahan serutan kayu albasia, kadar air yang dimiliki lebih besar yang disebabkan jumlah air yang terkandung pada serutan kayu albasia lebih besar dibandingkan dengan sekam padi sementara perlakuan pengeringan yang diberikan sama sehingga berpengaruh terhadap kadar air akhir yang dimiliki briket.

Pengujian kadar abu pada Tabel 2 terlihat bahwa kadar abu menurun seiring dengan kenaikan variasi konsentrasi bahan serutan kayu albasia yang ditambahkan. Nilai kadar abu tertinggi terdapat pada sampel A2 yaitu 36,10%, sementara nilai kadar abu terendah dimiliki sampel briket A5 yaitu 24,29%. Hal ini berkaitan dengan kandungan silika yang dimiliki setiap bahan berbeda. Semakin rendah kandungan silika yang dimiliki maka akan semakin rendah kadar abu dari suatu bahan. Kandungan silika pada serutan kayu albasia cukup kecil yaitu 0,2% [8] sehingga kadar abunya kecil. Ukuran partikel briket yang lebih kecil menghasilkan kadar abu yang rendah.

Pengujian karakteristik briket lainnya adalah zat terbang atau zat mudah menguap pada briket merupakan senyawa selain abu, air dan karbon. Unsur-unsur dari zat terbang diantaranya adalah

hidrokarbon, metana dan karbon monoksida. Briket dengan kadar zat terbang yang tinggi akan mudah terbakar namun asap yang dihasilkan banyak. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kadar zat terbang yang dimiliki briket dengan bahan serutan kayu albasia lebih tinggi dibandingkan briket berbahan sekam padi sebesar 29,48%. Semakin banyak konsentrasi dari serutan kayu albasia maka kadar zat terbang yang dihasilkan juga akan semakin tinggi. Hal ini dapat dipengaruhi oleh kadar abu yang dimiliki. Semakin tinggi kadar abu yang dimiliki suatu briket, maka unsur-unsur lainnya yang mudah menguap pada bahan akan semakin sedikit dan menghasilkan kadar zat terbang yang semakin sedikit.

Pengujian keempat yaitu pengujian karbon terikat yang dilakukan untuk mengetahui fraksi karbon (C) pada briket melalui perhitungan 100% dikurangi jumlah dari ketiga karakteristik briket lainnya (kadar air, kadar abu dan kadar zat terbang). Serutan kayu albasia memiliki nilai karbon terikat yang lebih tinggi sebesar 50,75% dibandingkan dengan sekam padi sebesar 39,14%. Kondisi ini dipengaruhi oleh komponen-komponen penyusun biomassa seperti selulosa, hemiselulosa dan lignin yang berbeda jumlahnya untuk serutan kayu albasia dan sekam padi. Serutan kayu albasia memiliki kandungan selulosa yang lebih tinggi (51,54%) dibandingkan dengan sekam padi (31,12%) [7]. Selain itu suhu karbonisasi mempengaruhi hasil kadar karbon terikat suatu briket, suhu karbonisasi serutan kayu albasia lebih tinggi sebesar 300°C dibandingkan suhu karbonisasi sekam padi sebesar 233,96°C, sehingga penguraian komponen selulosa, hemiselulosa dan lignin pada setiap bahan berbeda-beda untuk menghasilkan kadar karbon terikat yang tinggi. Dalam penelitian ini, penambahan konsentrasi serutan kayu albasia pada briket meningkatkan nilai karbon terikat briket. Nilai karbon terikat tertinggi untuk briket campuran dengan ukuran 60 mesh dan 100 mesh terdapat pada briket dengan perbandingan konsentrasi sekam padi : serutan kayu albasia 50 : 50 yaitu 45,88% dan 44,7%.

Pengujian nilai kalor yang dimiliki oleh briket menentukan kualitas dari briket tersebut dan tinggi atau rendahnya nilai kalor dipengaruhi oleh kadar karbon terikat. Selain itu juga dipengaruhi oleh karakteristik briket lainnya meliputi kadar air, kadar abu dan kadar zat terbang. Nilai kalor tertinggi untuk briket campuran dengan ukuran 60 mesh dan 100 mesh terdapat pada briket dengan perbandingan konsentrasi sekam padi : serutan kayu albasia 50 : 50 yaitu 4371 kkal/kg dan 4438 kkal/kg. Hal ini menunjukkan bahwa serutan kayu albasia mampu meningkatkan nilai kalor dari briket berbahan utama sekam padi. Dan jika ditinjau berdasarkan ukuran partikel briketnya, maka semakin halus partikel briket akan menghasilkan nilai kalor yang semakin tinggi. Hal ini karena dengan ukuran partikel briket yang semakin kecil maka akan diperoleh briket dengan kerapatan yang lebih baik, sehingga pada saat pembakaran dapat menghasilkan panas dengan baik.

3.2 Hasil Uji Emisi Karbon Monoksida

Pengujian emisi karbon monoksida dilakukan untuk mengetahui kandungan CO yang terbentuk pada saat proses pembakaran briket yang tidak sempurna. Semakin sedikit kandungan CO yang dihasilkan, maka kualitas briket semakin baik dari segi bahan bakar ramah lingkungan. Pengujian kadar karbon monoksida dilakukan untuk setiap variasi konsentrasi briket dengan dua jarak pengukuran yaitu 15 cm dan 20 cm. Hasil uji emisi CO yang diperoleh seperti yang tertera pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Uji Emisi CO.

Kode Sampel	Emisi Karbon Monoksida Rata-rata (ppm)	
	15 cm	20 cm
A1	816,26	745,32
A2	897,12	834,56
A3	745,38	696,12
A4	865,13	806,84
A5	733,72	688,48
A6	799,38	717,76
B1	824,61	685,82
B2	895,00	825,81
B3	876,33	826,46
B4	864,48	798,33
B5	728,36	650,12
B6	826,94	680,78

Titik pengambilan data kadar karbon monoksida divariasikan untuk melihat pengaruh jarak terhadap kadar karbon monoksida pada udara. Hasil pengujian didapatkan bahwa pada jarak 20 cm dari sumber, kadar karbon monoksida yang terukur semakin rendah dibandingkan pada titik pengambilan dengan jarak 15 cm. Hal ini dipengaruhi oleh kecepatan aliran udara yang semakin besar pada jarak yang semakin jauh pada saat pengambilan data sehingga menyebabkan kadar karbon monoksida semakin kecil.

Apabila ditinjau dari konsentrasi sekam padi dan serutan kayu albasia secara keseluruhan, maka didapatkan kadar CO tertinggi untuk ukuran partikel 100 mesh dan 60 mesh yaitu pada variasi briket A2 dan B2 dengan nilai 897,12 ppm dan 895 ppm pada jarak pengukuran 15 cm. Sementara kadar CO terendah terdapat pada variasi briket campuran A5 dan B5 yaitu sebesar 688,48 ppm dan 650,12 ppm pada jarak pengukuran 20 cm. Hal ini menandakan bahwa semakin sedikit konsentrasi sekam padi pada briket campuran, maka emisi CO semakin rendah dengan rata-rata penurunan 6%. Pada pengujian emisi karbon monoksida dengan jarak pengukuran 20 cm, terlihat adanya pengaruh ukuran partikel briket yaitu kadar emisi karbon monoksida akan lebih sedikit pada ukuran 60 mesh dibandingkan ukuran 100 mesh. Data yang didapatkan untuk variasi A1 dan B1 berturut-turut yaitu 745.32 ppm dan 685.82 ppm. Hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Komala Affiyanti A (2018), yang mengatakan bahwa semakin kasar ukuran partikel briket maka akan menghasilkan kadar emisi karbon monoksida yang lebih optimum [6]. Berdasarkan penelitian yang dilakukan didapatkan nilai emisi karbon monoksida optimum yaitu sebesar 650,12 ppm pada briket berukuran 60 mesh dengan konsentrasi perbandingan bahan sekam padi dan serutan kayu albasia 50:50. Standar karbon monoksida untuk briket batubara berdasarkan Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral yaitu sebesar 726 mg/Nm³ atau setara dengan 581 ppm. Dengan melihat standar ini, maka kadar karbon monoksida optimum dari briket campuran sekam padi dan serutan kayu albasia ukuran 60 mesh dari hasil penelitian masih tergolong tinggi yaitu 10% diatas standar baku. Berdasarkan standar kesehatan, 667 ppm memberikan dampak pembentukan 50% karboksil

hemoglobin pada tubuh. Kadar karbon monoksida terendah yang dihasilkan dalam penelitian ini dibawah standar namun tergolong cukup tinggi.

3.3 Hasil Uji Laju Pembakaran

Hasil uji laju pembakaran dapat dilihat pada Tabel 4 menunjukan untuk setiap variasi ukuran partikel briket, laju pembakaran cenderung mengalami peningkatan seiring dengan penambahan konsentrasi serutan kayu albasia pada briket campuran. Salah satu karakteristik dari briket yang mempengaruhinya adalah karbon terikat.

Tabel 4. Hasil uji laju pembakaran briket.

Kode Sampel	Laju Pembakaran (gram/menit)	Kode Sampel	Laju Pembakaran (gram/menit)
A1	0,4556	B1	0,3929
A2	0,4646	B2	0,3778
A3	0,4343	B3	0,4815
A4	0,4667	B4	0,4643
A5	0,5595	B5	0,5556
A6	0,5882	B6	0,5686

Dari Tabel 4 dapat dilihat bahwa nilai kalor meningkat terhadap nilai karbon terikat. Dengan nilai kalor tinggi yang tersimpan pada suatu briket maka akan menyebabkan pembakaran briket berlangsung dalam waktu yang lebih singkat. Karakteristik dari briket lainnya yang mempengaruhi laju pembakaran yaitu kadar zat terbang. Briket serutan kayu albasia memiliki kadar zat terbang yang lebih tinggi dibandingkan dengan briket sekam padi dan hal ini berpengaruh terhadap briket campuran dari sekam padi dan serutan kayu albasia. Semakin banyak konsentrasi serutan kayu albasia pada briket campuran, maka kadar zat terbang akan meningkat. Dengan kadar zat terbang yang tinggi, proses pembakaran berlangsung lebih cepat. Laju pembakaran tercepat pada briket campuran didapatkan pada variasi A5 dan B5 dengan konsentrasi sekam padi : serutan kayu albasia 50:50 yaitu sebesar 0,5595 gram/menit dan 0,5556 gram/menit dimana kedua briket ini memiliki kadar karbon terikat dan kadar zat terbang terbesar dibandingkan dengan briket campuran lainnya. Sementara waktu pembakaran briket terlama yaitu pada A3 dan B2 menghasilkan laju pembakaran paling lambat dibandingkan briket lainnya. Briket A3 memiliki laju pembakaran 0,4343 gram/menit dan briket B2 memiliki laju pembakaran 0,3778 gram/menit. Hal ini menunjukan penambahan serutan kayu albasia mampu mempercepat laju pembakaran pada briket campuran 50:50 berukuran partikel 100 mesh dan 60 mesh sebesar 22% dan 41%.

4. Simpulan

Berdasarkan hasil penelitian bahwa semakin sedikit jumlah konsentrasi bahan pencampur pada briket berbasis sekam padi, maka menghasilkan kadar emisi karbon monoksida yang lebih sedikit. Hasil pengujian kadar karbon monoksida terendah terdapat pada briket campuran dengan konsentrasi 50:50 yaitu 650,12 ppm. Sementara, konsentrasi serutan kayu albasia pada briket sekam padi yang semakin banyak, maka akan semakin cepat laju pembakarannya. Laju pembakaran

tercepat terdapat pada briket campuran dengan konsentrasi 50:50 yaitu 0,5595 gram/menit. Hal ini dapat dikatakan bahwa briket ini dapat digunakan sebagai bahan bakar yang baik.

Ucapan Terima Kasih

Terimakasih kepada Direktorat Riset dan Pengabdian Pada Masyarakat Universitas Padjajaran yang telah memberikan dana hibah internal melalui Hibah Riset Unggulan tahun anggaran 2018 dan Laboratorium Energi Terbarukan dan Sistem Departemen Fisika Unpad atas terselenggaranya penelitian ini.

Daftar Pustaka

1. Jaelani, A. 2017. Purnomo, Hadi. 2013. *Renewable Energy Policy in Indonesia: Scientific Signs of The Qur'an and Its Implementation in Islamic Economics*. MPRA Paper.
2. Yokoyama, S.. 2008. *Buku Panduan Biomassa Asia: Panduan untuk Produksi dan Pemanfaatan Biomassa*. Jepang: The Japan Institute of Energy.
3. Rahmawati, L., Rizky Stiyabudi, dan Christin Lita Agustiani. 2010. *Pengaruh Laju Aliran Udara Terhadap Karakteristik Laju Aliran Udara Terhadap Karakteristik Pembakaran Biobriket dari Limbah Penggilingan Padi (Sekam)*. Padang: Universitas Negeri Yogyakarta.
4. Winata, A. 2013. *Karakteristik Biopellet dari Campuran Serbuk Kayu Sengon Dengan Arang Sekam Padi Sebagai Bahan Bakar Alternatif Terbarukan*. Bogor: Institut Pertanian Bogor.
5. Yuliwati, E. 2013. *Emisi Gas Buang Biomassa dengan Menggunakan Sistem Pressurized Fluidized Bed Combustion*. Sumatera Selatan: Univeristas Bina Darma.
6. Affandi, K. A. 2018. *Analisa Ukuran Butir Briket Campuran Sekam Padi Dengan Cangkang Kopi Terhadap Laju Pembakaran dan Emisi Karbon Monoksida (CO)*. Jurnal Material dan Energi Indonesia, Vol. 08, No. 01 (2018), hal. 44 – 48, Departemen Fisika FMIPA Universitas Padjajaran.
7. Hartati, N. S. 2016. *Prospek Penggunaan Kayu Rendah Lignin Hasil Teknologi DNA untuk Proses Pulping Yang Efisien Dan Ramah Lingkungan*. Ecolab. 10.
8. Martawijaya, A dkk, 2005. *Atlas Kayu Indonesia Jilid I*. Bogor: Badan Penelitian danPengembangan Departemen Kehutanan.

PENINGKATAN KELARUTAN POLIANILIN MELALUI TURUNANNYA UNTUK BAHAN KOMPOSIT

FITRILAWATI[†]

Departemen Fisika,
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Padjadjaran
Jl. Raya Bandung-Sumedang Km 21, Jatinangor 45363

Abstrak. Polianilin (PANI) memiliki sifat yang beragam bergantung pada tingkat oksidasinya. Keunggulan tersebut membuat PANI sampai saat ini banyak digunakan untuk berbagai bahan komposit. Namun kelarutan PANI kurang baik, sehingga untuk meningkatkan kelarutannya perlu memodifikasi struktur dengan membuat turunan PANI. Pada makalah ini dilaporkan pembuatan turunan PANI berupa poliethoksi anilinin (E-PANI) melalui substitusi atom H dengan gugus ethoksi (OC_2H_5) pada gugus fenil. Polimer E-PANI yang dihasilkan memiliki kelarutan yang lebih baik dibanding PANI sehingga dapat dibuat menjadi lapisan tipis dengan ketebalan yang beragam. Struktur dan sifat optik E-PANI sedikit berubah dibandingkan dengan PANI, yang mana λ_{maks} bergeser ke arah panjang gelombang pendek. Berkurangnya λ_{maks} mengindikasikan berkurangnya panjang konjugasi yang mungkin disebabkan terganggunya konjugasi rantai akibat kehadiran gugus substitusi.

Kata kunci : PANI, E-PANI, kelarutan, sifat optik, komposit

Abstract. Polyaniline (PANI) has varied properties depend on its oxidation state. The advantages of PANI make this material widely used for various composite material. However, PANI is less soluble, so in order to improve its solubility, it is necessary to modify its structure through derivatization. We report synthesis of PANI derivative of polyethoxy aniline (E-PANI) through substitution of H atoms of phenyl ring with ethoxy (OC_2H_5) side chain. The synthesized E-PANI has better solubility than PANI and can be made into thin films with varying thickness. Structure and optical property of E-PANI is slightly changed than PANI, its λ_{max} is slightly shifted to shorter wavelength that indicated reduction of conjugation length due to present of ethoxy side chain.

Keywords: PANI, E-PANI, solubility, optical property, composite

1. Pendahuluan

Polianilin (PANI) merupakan bahan fungsional yang unik karena sifatnya dipengaruhi oleh tingkat oksidasinya [1, 2]. Ada tiga macam tingkat oksidasi PANI yaitu basa leucoemeraldin yang tereduksi penuh, basa emeraldin yang teroksidasi sebagian dan basa pernigranilin yang teroksidasi penuh [2]. Variasi sifat yang berkaitan dengan struktur tersebut memungkinkan bahan PANI digunakan untuk berbagai aplikasi seperti sensor, baterai, antistatik, elektrokromik dan sebagainya [1]. Hingga saat ini bahan PANI masih banyak dikaji [3, 4] dan digunakan sebagai bahan komposit. Salah satu bahan komposit PANI yang banyak dikaji adalah PANI-Graphene Oxide yang digunakan untuk aplikasi divais penyimpan energi [5, 6].

Sama seperti polimer konduktif umumnya, kelarutan PANI dalam pelarut organik kurang baik. PANI hanya larut sedikit pada pelarut organik seperti N,N-Dimethyl formamide (DMF), N-methyl-2-pyrrolidone (NMP), dan Dimethyl sulfoxide (DMSO). Kondisi tersebut tidak

[†] Email : fitrilawati@phys.unpad.ac.id

memungkinkan pembuatan lapisan PANI yang relatif tebal untuk suatu aplikasi. Selain itu, kelarutan polimer juga merupakan faktor penting dalam pembuatan bahan komposit.

Untuk meningkatkan solubilitas polimer konduktif biasa dibuat bentuk turunan melalui modifikasi struktur (pendekatan kimia), diantaranya dengan mensubstitusi atom-atom H tertentu dengan gugus alkil atau alkoksi [7]. Modifikasi tersebut dilakukan pada tahap monomernya, sehingga sintesisnya dapat dilakukan dengan menggunakan proses reaksi yang sama dengan proses sintesis polimer yang bersangkutan.

Pada makalah ini akan disintesis turunan PANI berupa poliethoksi anilin (E-PANI), yaitu polimer yang dibuat dari monomer anilin yang atom H diganti dengan gugus fungsi etoksi (OC_2H_5). Polimer tersebut selanjutnya akan digunakan untuk membentuk komposit dari Graphene Oxide yang sudah dilaporkan sebelumnya [8, 9]. Hasil polimer yang didapat diuji kelarutannya, diukur struktur dan berat molekulnya, sifat termal dan sifat optiknya. Data-data tersebut berguna untuk memanfaatkan PANI dalam pembuatan komposit.

2. Eksperimen

Sintesis polimer PANI dan E-PANI dilakukan secara kimiawi menggunakan monomer anilin ($\text{C}_6\text{H}_5\text{NH}_2$, 99,9 % *Merck*) dan o-Phenitidine ($((\text{C}_2\text{H}_6\text{O})\text{C}_6\text{H}_4\text{NH}_2$ 97 %, Aldrich). Pembuatan polimer diawali dengan penyiapan larutan monomer yang terdiri dari monomer yang telah didestilasi dan 250 ml 1M HCl (*Merck* 37 %) dengan suhu sekitar 1°C dan penyiapan larutan inisiator yang terdiri dari amonium persulfat ($(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ *Merck*) dan 250 ml 1 M HCl dengan suhu sekitar 1°C . Polimerisasi dilakukan dengan meneteskan larutan inisiator ke dalam larutan monomer dengan kecepatan sekitar 2 ml/menit pada suhu sekitar 0°C . Selama proses tersebut, larutan monomer diaduk dengan pengaduk magnetik agar reaksi tersebut dapat berjalan dengan baik. Polimerisasi ini selesai dalam waktu 4 jam dan sebagai hasilnya diperoleh garam emeraldin (*Emeraldine Salt*, ES). Bentuk basa emeraldin (*Emeraldine Base*, EB) diperoleh dengan proses deprotonasi dalam larutan 0,1 M NH_4OH . Basa emeraldine E-PANI tersebut kemudian dicuci dengan Acetone sampai filtratnya menjadi tidak berwarna, dan kemudian dikeringkan dalam vakum selama 48 jam.

Selain kelarutan, efek dari substitusi gugus etoksi juga dikaji pada berat molekul, struktur, sifat optik dan stabilitas termal. Spektrum IR dari polimer diukur dengan spektrometer *Shimadzu Fourier Transform Infrared Spectrophotometer* FT-IR 8501 dengan sampel berupa pelet yang dibuat dari bubuk polimer dan KBr. Selanjutnya, berat molekul polimer diukur dengan teknik GPC dengan menggunakan polistiren (PS) sebagai pembanding dan dimetilformamid (DMF) sebagai pelarut. Sifat termal polimer diukur dengan metoda TGA menggunakan alat analisa termal Mettler TA 3000 system dengan laju pemanasan 10°C /menit. Spektrum transmisi UV-Vis diukur menggunakan lambda 9 spectrophotometer dari Perkin Elmer.

3. Hasil dan Pembahasan

Polimer hasil sintesis berupa bubuk yang berwarna hitam kehijauan pada keadaan ES dan berwarna hitam kecoklatan pada keadaan EB. Dalam bentuk ES, PANI hasil sintesis tersebut dapat larut dengan baik dalam H_2SO_4 dan HCl pekat, namun tidak larut dalam pelarut organik yang lazim dipakai. Dalam bentuk EB, PANI hasil sintesis selain dapat larut dengan baik dalam H_2SO_4 dan HCl pekat, dapat pula larut sebagian dalam pelarut organik seperti DMSO, DMF, dan NMP,

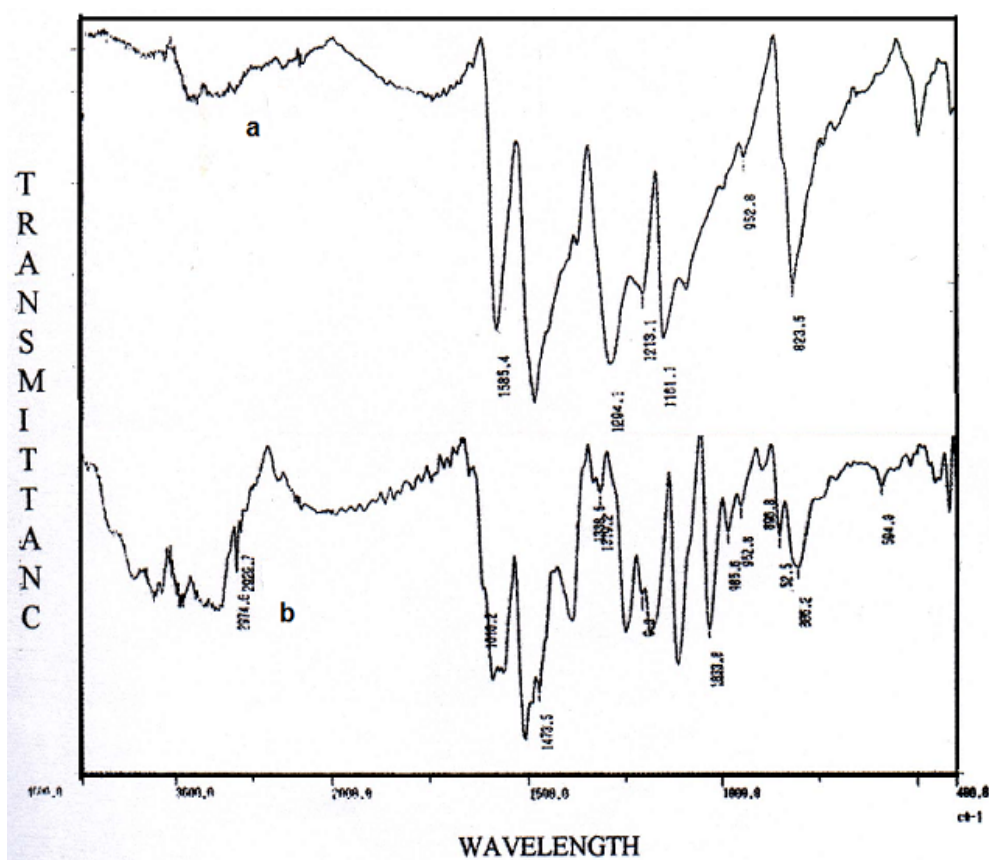
sesuai dengan hasil yang telah dilaporkan sebelumnya [2]. Hasil uji kelarutan pada polimer tersebut menunjukkan bahwa E-PANI dari hasil sintesis mempunyai kelarutan yang lebih baik dibandingkan PANI. Sebagai contoh, E-PANI yang berbentuk EB dapat larut dalam pelarut organik seperti kloroform, DMF, NMP, dan DMSO sesuai dengan hasil yang telah dilaporkan sebelumnya [7]. Selain itu, E-PANI dapat juga larut di dalam THF. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penambahan gugus alkoksi pada gugus fenil telah berhasil meningkatkan kelarutan PANI. Peningkatan kelarutan tersebut sangat penting dan berguna dalam rangka perbaikan kualitas film tipis yang dibuat karena dimungkinkan variasi konsentrasi pada proses fabrikasi film yang menggunakan teknik larutan seperti *solution casting*, *dipcoating* dan *spincoating*. Peningkatan kelarutan juga penting dalam pembuatan komposit, terutama komposit dengan struktur multilayer.

Berat molekul (BM) dari polimer yang bersangkutan yang diukur dengan menggunakan standar polistiren dengan pelarut DMF diperlihatkan dalam tabel 1. Berat molekul dari polimer tersebut lebih besar dari 15000 g/mol sehingga memenuhi persyaratan untuk fabrikasi film tipis yang menggunakan teknik larutan.

Tabel 1. Berat molekul PANI dan E-PANI dari hasil pengukuran dengan GPC menggunakan polistiren sebagai standar dan DMF sebagai pelarut.

Polimer	M_n (g/mol)	M_w (g/mol)	M_z (g/mol)	M_v (g/mol)
PANI	$8,46 \times 10^3$	$1,69 \times 10^4$	$3,26 \times 10^4$	$1,54 \times 10^4$
E-PANI	$1,25 \times 10^4$	$2,59 \times 10^4$	$4,04 \times 10^4$	$2,40 \times 10^4$

Perbandingan antara struktur PANI dan E-PANI yang berbentuk EB diperlihatkan oleh spektrum FTIR dalam gambar 1. Beberapa puncak absorpsi yang terdapat baik pada PANI adalah 1585 cm^{-1} (C=C *stretching*), 1488 cm^{-1} (C=N atau C-C *stretching*), 1294 cm^{-1} (C-N *stretching*, C-C *stretching*, C-H *bending*), 1161 cm^{-1} (C-H *bending*), 1100 cm^{-1} (*ring deformation* dan C-H *bending*), 823 cm^{-1} (C-H *out-plane bending*). Pola spektrum E-PANI mempunyai kemiripan dengan spektrum PANI seperti yang diperlihatkan dalam tabel 2. Kehadiran gugus substitusi etoksi (OC₂H₅) pada turunan PANI ditunjukkan oleh kehadiran puncak absorpsi baru pada daerah 1200 cm^{-1} dan 1030 cm^{-1} , yang berkaitan dengan modulus vibrasi ikatan C-O-C dan puncak absorpsi pada daerah 2930 cm^{-1} , 2830 cm^{-1} , 1430 cm^{-1} dan 1400 cm^{-1} , yang berkaitan dengan modulus vibrasi CH₃. Keberadaan gugus etoksi diperjelas oleh vibrasi *scissoring* gugus CH₂ pada daerah 1465 cm^{-1} . Posisi gugus substitusi etoksi pada gugus fenil ditunjukkan oleh adanya vibrasi pada daerah 840 cm^{-1} dan 800 cm^{-1} . Secara umum, molekul turunan PANI mempunyai tingkat oksidasi yang mirip dengan molekul PANI-EB yang ditunjukkan oleh perbandingan puncak absorpsi IR di daerah sekitar 1600 cm^{-1} dan 1500 cm^{-1} . Hasil ini menunjukkan bahwa turunan PANI yang dibuat sudah sesuai dengan yang diharapkan, yaitu berbentuk EB.

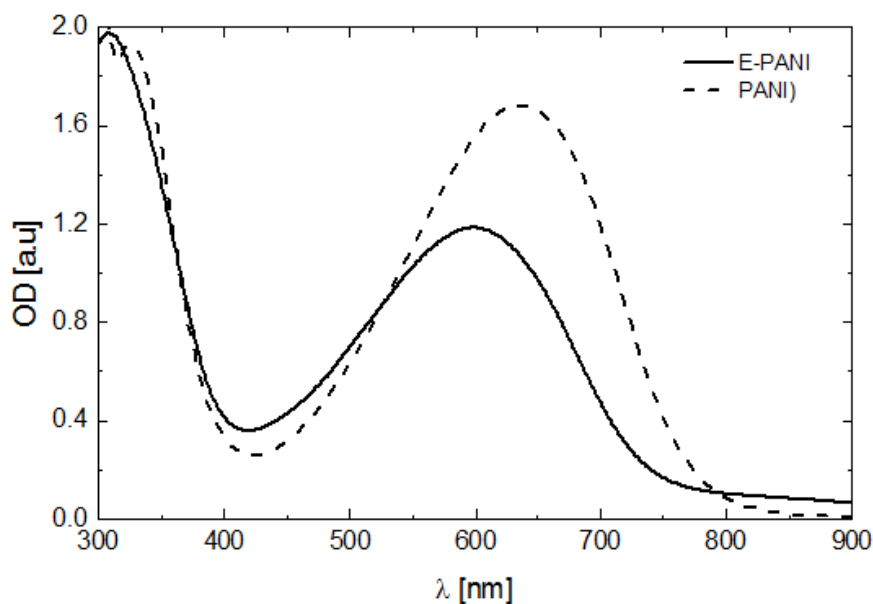


Gambar 1. Spektrum inframerah bubuk polimer PANI (a), dan E-PANI (b) dalam bentuk pelet yang terbuat dari bubuk polimer dan KBr.

Tabel 2. Perbandingan puncak absorpsi spektrum FTIR PANI dan E-PANI

PANI	E-PANI	Indikasi
	2974	CH ₃ asymmetric stretching
	2929	CH ₂ asymmetric stretching
1585	1591 1508	C=C stretching (Q)
	1465	CH ₂ scissoring
1488	1473	C=N stretching (Q), C-C stretching (B)
	1442	CH ₃ asymmetric bending
	1392	CH ₃ symmetric bending
1294	1319	C-H bending (Q)
1213	1252	C-N stretching, C-C stretching, C-H bending (B)
	1200	(C-O-C) asymmetric stretching
1161	1188	C-H bending (Q)
1100	1115	Ring deformation (Q), C-H bending (Q)
	1033	(C-O-C) symmetric stretching
823	852	C-H out-plane bending
	806	bensen pada posisi orto

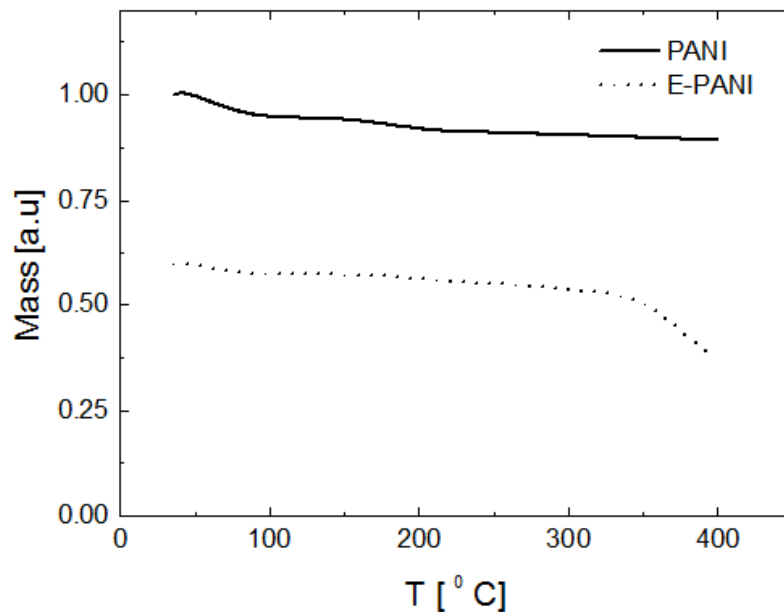
Spektrum UV-VIS dari PANI yang diukur dalam larutan NMP dan E-PANI dalam larutan kloroform diperlihatkan dalam gambar 2. Semua spektrum tersebut mempunyai pola yang mirip, yaitu terdiri dari dua puncak absorpsi yang masing-masing pada daerah UV dan Vis. Puncak absorpsi pada daerah UV dan pada daerah Vis berkaitan dengan keberadaan gugus benzoid dan kuinoid. Perbedaan di antara kedua spektrum UV-Vis tersebut terletak pada posisi λ_{maks} yang menyiratkan perbedaan struktur elektronik akibat substitusi gugus ethoksi pada gugus fenil dalam polimer tersebut.



Gambar 2. Spektrum UV-Vis-Nir dari E-PANI emeraldine base dalam pelarut Chloroform dibandingkan dengan PANI dalam pelarut NMP

Sebagai hasil polimerisasinya diperoleh bubuk E-PANI yang berwarna kehitaman. Bubuk ini berubah menjadi warna biru, jika dilarutkan dalam pelarut seperti NMP dan Chloroform. Dibandingkan dengan bahan PANI, E-PANI memiliki kelarutan lebih baik dalam Chloroform, DMF, NMP, dan DMSO. Dengan demikian, pembuatan film tipis dengan metoda “casting” dapat dilakukan lebih mudah dengan menggunakan berbagai macam konsentrasi.

Hasil pengukuran stabilitas termal PANI dan turunannya dengan menggunakan TGA diperlihatkan dalam gambar 3. Termogram dari PANI memperlihatkan adanya pengurangan berat secara cepat dari suhu ruang sampai dengan 120 °C dan pengurangan berat secara perlahan sampai dengan suhu 400 °C. Pengurangan berat yang pertama berkaitan dengan kelembaban, yaitu pengurangan kadar air pada polimer yang bersangkutan, sedangkan pengurangan berat yang kedua berkaitan dengan putusnya rantai-rantai pendek. Secara keseluruhan, pemanasan PANI dari suhu ruang sampai dengan 400 °C telah mengurangi berat PANI sebanyak 10 %. Karakteristik termogram dari E-PANI mirip dengan PANI. Suhu dekomposisi dari polimer hasil sintesis cukup tinggi yaitu masing-masing di atas 400 °C untuk PANI dan 360 °C untuk E-PANI.



Gambar 3. Termogram dari PANI (garis solid) dan E-PANI (garis titik)

4. Simpulan

Hasil eksperimen menunjukkan bahwa pencantolan gugus ethoksi pada gugus fenilen telah meningkatkan kelarutan PANI. Peningkatan kelarutan tersebut sangat bermanfaat dalam pemanfaatan PANI sebagai bahan komposit. Peningkatan kelarutan akibat perubahan struktur tersebut disertai perubahan sifat optik dan sifat termal. Pencantolan gugus ethoksi tersebut telah menyebabkan pergeseran puncak absorpsi ke daerah panjang gelombang pendek yang mengindikasikan berkurangnya konjugasi akibat kehadiran gugus ethoksi.

Daftar Pustaka

1. MacDiarmid, A.G., and A.J. Epstein, 1989, Faraday Discuss. Chem. Soc. 88, 317 -332
2. Angelopoulos, M., G.E. Asturias, S.P. Ermer, A. Ray, E.M. Scherr, and A.G. MacDiarmid., 1988, Mol. Cryst. Liq. Cryst. **160**, 151-163
3. Liao, G., Q. Li, Z. Xu, 2019, Progress in Organic Coatings 126, 35–43
4. Waware, U.S., A.M.S. Hamouda, M. Rashid, 2019, Appl. Phys. A 125: 127
5. Li, J., H. Xie, Y. Li, J. Wang, 2013. J. Nanoscie. and Nanotech., 13, 1132-1135
6. Huang, Z., L. Li, Y. Wang, C. Zhang, T. Liu, 2018, Composites Communications 8, 83-91
7. D'Aprano, G., M. Leclerc, G. Zotti, G. Schiavon, 1995, Chem. Mater. 7, 33-42.
8. Norman Syakir, Rhesti Nurlina, Syafiul Anam, Annisa Aprilia, Sahrul Hidayat, Fitrilawati, 2015, Jurnal Fisika Indonesia 19 (56), hal 26-19
9. D. Lesmana, G. Pranata, R. Nurlina, A. Aprilia, N. Syakir, Fitrilawati, 2016, Jurnal Material dan Energi Indonesia 6, 15-19

PEMODELAN DAN SIMULASI AMORPHOUS SILICON QUANTUM DOT (a-SiQD) MENGUNAKAN METODE EXTENDED HÜCKEL THEORY

SETIANTO[†], SAHRUL HIDAYAT, LIU KIN MEN, AHMAD ROFIQ

*Departemen Fisika,
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Padjadjaran
Jl. Raya Bandung-Sumedang Km 21, Jatinangor 45363*

Abstrak. Quantum Dot adalah bahan nanokristal semikonduktor yang sangat kecil sehingga menyebabkan energi gapnya merupakan fungsi dari ukuran partikel, semakin kecil ukuran partikel menghasilkan energi gap yang semakin besar. Salah satu jenis bahan Quantum Dot adalah amorphous Silicon Quantum Dot (a-SiQD) yang memiliki potensi besar untuk bahan teknologi optoelektronik dan telah dikembangkan secara eksperimen nanostruktur a-SiQD untuk mempelajari efek quantum confinement dan karakteristik emisi cahaya. Pada penelitian ini, dibuat model kluster a-SiQD dengan melakukan teknik translasi untuk memperbesar ukuran dan membuat kluster berbentuk bulat dengan menghapus beberapa atom silikon terluar dan menambahkan atom hidrogen. Untuk mendapatkan karakteristik elektronik dan optik kluster a-SiQD, dilakukan perhitungan energi gap menggunakan metode Extended Hückel Theory (EHT). Hasilnya, ketika variasi dot size kluster a-SiQD mengalami penurunan dari 2,1 nm ke 0,85 nm energi gap mengalami peningkatan dari 2,29 – 4,53 eV. Tidak hanya itu, bentuk bulat dan penambahan atom hidrogen juga mempengaruhi besar energi gap kluster a-SiQD. Sehingga rekayasa energi gap kluster a-SiQD dapat ditingkatkan dengan mengatur dot size, bentuk dan jumlah atom hidrogen.

Kata kunci : *Quantum Dot, a-SiQD, Extended Hückel Theory*

Abstract. Quantum Dot is a very small semiconductor nanocrystal material which causes the energy gap is a function of the size of the particle (dot size), and the energy gap of a-SiQD increases as the dot size decreases. This physical phenomenon is influenced by the quantum confinement effect. One of Quantum Dot material is Amorphous Quantum Dot Silicon (a-SiQD) which has a great potential for optoelectronic technology, and a good quality of a-SiQD nanostructures has grown experimentally to study the quantum confinement effect as well as the characteristics of light emission. In this study, we made some a-SiQD cluster models by doing translational technique to enlarge the cluster size and made round-shaped clusters by removing some of the outermost of silicon atoms and then adding some hydrogen atoms. To obtain the electronic and optical characteristics of a-SiQD clusters, energy gap calculation using the Extended Hückel Theory (EHT) method was performed. As a result, when dot size was decreased from 2.1 to 0.85 nm, the energy gap of a-SiQD clusters increased from 2.29 to 4.53 eV. Moreover, the round-shaped clusters and the process of addition of hydrogen atoms also affects the energy gap of the a-SiQD clusters. Thus, the engineering energy gap of a-SiQD clusters can be raised by adjusting the dot size, the shape of the cluster and the number of hydrogen atoms addition.

Keywords: *Quantum Dot, a-SiQD, Extended Hückel Theory* Pendahuluan

1. Pendahuluan

Quantum Dot (QD) adalah bahan nanokristal semikonduktor yang sangat kecil dan memiliki ukuran diameter kurang dari 10 nanometer. Karena ukuran QD yang sangat kecil menyebabkan karakteristik QD berbeda dibandingkan ukuran yang lebih besar. Semakin kecil ukuran diameter QD akan menghasilkan energi gap yang semakin besar, sedangkan semakin besar ukuran diameter QD menghasilkan energi gap yang semakin kecil. Maka dari itu, karakteristik elektronik energi gap QD merupakan fungsi dari ukuran atau radius diameter bahan (*dot size*) [1,2]. Beberapa hasil sintesis

[†] Email : setianto@phys.unpad.ac.id

QD jika dikenai cahaya akan memancarkan sinar dengan panjang gelombang tertentu, dan emisi panjang gelombang ini dapat diatur dengan mengubah ukuran diameter QD [3,4]. Emisi panjang gelombang biru dipancarkan oleh QD dengan diameter sekitar 2 nm, panjang gelombang hijau dipancarkan QD dengan diameter sekitar 3 nm, panjang gelombang kuning oleh QD dengan diameter sekitar 4 nm, dan panjang gelombang merah oleh QD berdiameter 5 nm [5]. Dimensi QD berada diantara ukuran molekul dan ukuran *bulk* [6]. Istilah QD disebut sebagai klaster, karena ukuran QD terlalu kecil untuk memiliki sifat fungsi gelombang elektronik ukuran *bulk* meskipun QD menunjukkan struktur kristal hampir mirip dengan *bulk*. Karena QD termasuk orbital molekul klaster dan energinya mengalami kuantisasi, menghasilkan level energi yang diskrit dan digambarkan sebagai pita HOMO (*Highest Occupied Molecular Orbital*) – LUMO (*Lowest Unoccupied Molecular Orbital*) seperti pita energi pada bahan *bulk* yang digambarkan sebagai *band structure* [2]. Salah satu bahan semikonduktor QD adalah *Silicon Quantum Dot* (SiQD). Ada dua jenis silikon yaitu *crystalline silicon* (c-Si) dan *amorphous silicon* (a-Si). Namun a-Si memiliki dua keuntungan dibandingkan dengan c-Si. Yakni efisiensi *luminescence* a-Si lebih baik dibanding c-Si karena struktur yang acak. Dan energi gap a-Si (1,6 eV) lebih besar dibandingkan c-Si (1,12 eV). Akibatnya a-Si dapat digunakan sebagai bahan yang baik untuk pemancar cahaya panjang gelombang pendek (*short-wavelength luminescence*) [8,9]. Dan pada penelitian ini digunakan SiQD bentuk amorf atau a-SiQD, karena dengan bentuk amorf maka komposisi molekulnya tidak teratur menyebabkan energi gap akan bertambah besar [8]. perkembangan penelitian a-SiQD, ukuran diameter a-SiQD (*dot size*) yang dibuat hasil sintesis berkisar antara 1,4 – 2,4 nm [8,9]. Ukuran diameter a-SiQD hasil eksperimen belum mencapai kurang dari 1 nm karena memang pada teknik sintesis a-SiQD yang sulit. Namun dalam penelitian ini melakukan perhitungan teoritik komputasi untuk mempelajari karakteristik energi gap pada model klaster a-SiQD. Model klaster a-SiQD yang dibuat bahkan dengan ukuran kurang dari 1 nm sehingga dapat digunakan untuk memprediksi karakteristik elektronik a-SiQD. Perhitungan teoritik komputasi ini menggunakan pendekatan Linear Combination of Atomic Orbitals (LCAO) dan menggunakan metode Extended Hückel Theory (EHT) yang memperhitungkan semua elektron valensi dan juga tidak mengabaikan interaksi antara orbital atom (*integral overlap*) [10]. Manfaat yang ingin dicapai dari penelitian ini adalah memodelkan klaster a-SiQD dan mengitung energi gap dengan metode EHT sehingga mengetahui karakteristik pengaruh *dot size* dan bentuk terhadap energi gap yang dapat digunakan sebagai referensi untuk sintesis a-SiQD pada rekayasa energi gap dan dapat digunakan dalam berbagai aplikasi teknologi elektronik dan fotonik.

2. Eksperimen (Pemodelan a-SiQD)

Silikon adalah bahan yang dominan dalam teknologi elektronika skala mikro dan nano. Akan tetapi karena Si memiliki struktur celah energi yang *indirect* menyebabkan Si tidak aplikatif sebagai bahan teknologi piranti fotonik atau optoelektronik seperti LED [17]. Perkembangan teknologi terkini dari bahan Si telah mencapai pada teknologi skala nano yaitu fabrikasi struktur bahan nol dimensi yang dikenal sebagai *silicon nanocrystal* atau *silicon nanoparticle*. Material yang sangat kecil ini sering disebut sebagai titik atau *dot*, atau *silicon quantum dot* dapat disingkat SiQD [7]. Karena telah diketahui bahwa karakteristik QD berubah berdasarkan ukuran diameternya, hal ini juga berlaku untuk SiQD. Peristiwa menurunnya energi gap a-SiQD seiring dengan penurunan ukuran a-SiQD diakibatkan oleh peristiwa efek pengurungan ukuran kuantum (*quantum size confinement effect*). Partikel – partikel elektron dan hole akan semakin terkurung seiring dengan menurunnya ukuran a-SiQD, sehingga menyebabkan peningkatan energi gap pada bahan dan level – level keadaan energinya akan mengalami kuantisasi sehingga menghasilkan level energi yang diskrit. Pendekatan analitik untuk menjelaskan peristiwa perubahan energi gap seiring dengan semakin kecilnya ukuran

bahan akibat *quantum size confinement effect* pada semikonduktor nanopartikel adalah dengan persamaan *Effective Mass Approximation* (EMA) [1,2].

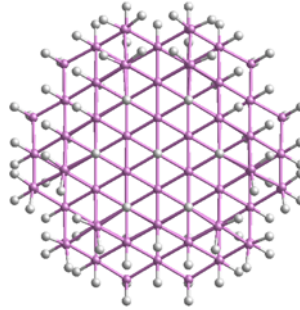
$$E_g(R) = E_{bulk} + \frac{\hbar^2 \pi^2}{2R^2} \left(\frac{1}{m_e^*} + \frac{1}{m_h^*} \right) - \frac{1,8e^2}{\epsilon R} \quad (2.1)$$

dengan: E_g = energi gap QD
 E_{bulk} = energi gap semikonduktor *bulk*
 R = radius QD
 m_e^* = massa efektif elektron
 m_h^* = massa efektif hole
 e = muatan elektron
 $\hbar$ = konstanta Planck
 ϵ = konstanta dielektrik

Suku pertama pada persamaan 2.1 di atas adalah energi gap dari material semikonduktor untuk ukuran *bulk* dan merupakan karakteristik tertentu dari bahan. Suku tambahan kedua menggambarkan penambahan energi gap karena efek pengurungan kuantum dan memiliki hubungan $\frac{1}{R^2}$ pada energi gap semikonduktor nanopartikel (E_g QD), hubungan $\frac{1}{R^2}$ inilah yang mengakibatkan bertambah besarnya energi gap a-SiQD ketika ukuran diameternya semakin kecil karena radius R partikel berhubungan dengan ukuran diameter bahan. Tambahan suku ketiga pada persamaan 2.1 menunjukkan energi interaksi Coulomb dari pasangan elektron dan hole dan memiliki hubungan $\frac{1}{R}$ pada energi gap. Sebenarnya hubungan $\frac{1}{R}$ ini bertolak belakang berkaitan dengan efek pengurungan kuantum pada suku kedua, semakin kecil ukuran diameter bahan maka suku ini akan menurunkan energi gap a-SiQD. Interaksi Coulomb pada bahan semakin menurun, memiliki harga yang kecil dan seringkali diabaikan karena harga konstanta dielektrik yang tinggi, sehingga yang mendominasi perubahan energi gap bahan adalah dari suku kedua akibat pengurungan kuantum. Konstanta 1,8 didapatkan dari interaksi Coulomb dan mengabaikan atom yang jaraknya jauh. Sehingga energi gap a-SiQD akan selalu meningkat dengan penurunan diameter bahan [1,2].

Pembuatan model klaster a-SiQD akan dilakukan beberapa tahap yang akan dijelaskan prosesnya sebagai berikut: i). Mencari referensi koordinat atomik kristal silikon yang berbentuk *diamond cubic* pada *American Mineralogist Crystal Structure Database* (AMCSD) dan mengunduh file dengan ekstensi cif (salah satu jenis file berisi struktur koordinat kristal atom). Penelitian ini menggunakan kristal *diamond* silikon dengan dengan nilai parameter kisi $a = b = c = 5,4455 \times 10^{-10}$ m, $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ dengan 8 atom silikon setiap *unit cell* [23]. Kemudian file berekstensi cif tersebut dibuka dengan aplikasi GDIS (aplikasi grafis struktur kimia) yang digunakan untuk memodifikasi struktur klaster a-SiQD. (ii) Memodifikasi struktur klaster silikon yang ada yaitu menambahkan jumlah molekul pada klaster sesuai *axial adding* atau dilakukan duplikasi dengan teknik translasi untuk menghasilkan sel satuan yang identik dengan operasi dengan persamaan $T = n_1a + n_2b + n_3c$ dimana n_1 , n_2 dan n_3 adalah bilangan bulat dan a , b dan c adalah vektor satuan dalam arah tiga dimensi, sehingga terbentuk klaster dengan ukuran yang lebih besar. Kemudian membuat klaster tersebut menjadi *supercell* agar hasil penjumlahan molekul menjadi satu *supercell*. (iii) Setelah menjadi satu klaster berukuran besar, kemudian menghapus beberapa atom pada posisi tertentu sehingga terbentuk klaster berbentuk bulat. Dan juga diperhatikan proses penghapusan jumlah atom agar mempertimbangkan jumlah atom sehingga terbentuk material *Silicon Quantum Dot* yaitu dengan kisaran diameter klaster 1 – 10 nm. (iv) Silikon mempunyai empat elektron valensi terluar, maka terdapat atom – atom silikon terluar pada klaster yang telah dibuat tidak berikatan empat, akan tetapi

ada beberapa atom terluar silikon yang hanya berikatan satu, dua atau tiga saja. Menurut teori pada keadaan tersebut tidaklah stabil secara ikatan sehingga mempengaruhi karakteristik kluster tersebut. Maka dari itu dilakukan penambahan atom hidrogen pada beberapa atom silikon terluar agar semua atom silikon pada kluster yang dibuat semuanya mempunyai ikatan empat, proses tersebut sering disebut hidrogenisasi.



Gambar 1. Kluster a-SiQD dengan Penambahan Atom Hidrogen

Hasil yang didapatkan pada penelitian ini adalah berupa model kluster a-SiQD dengan bentuk kluster a-SiQD bulat dan divisualisasikan menggunakan aplikasi ArgusLab. Hasil perhitungan energi gap untuk masing – masing model kluster a-SiQD berbeda – beda dan merupakan fungsi dari *dot size* kluster a-SiQD. Didapatkan hasil penelitian model kluster a-SiQD dengan ukuran diameter 0,85 nm, 1,1 nm, 1,5 nm, 1,74 nm dan 2,1 nm.

2.1 Perhitungan dan Simulasi a-SiQD

Dalam teori orbital molekul struktur elektronik molekul ditunjukkan oleh orbital molekul fungsi gelombang yang digambarkan sebagai kombinasi LCAO. Representasi persamaannya adalah:

$$\psi = \sum_i c_i \varphi_i \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (2.2)$$

Dengan ψ adalah fungsi eigen yaitu fungsi gelombangnya dan merupakan kombinasi linear dari fungsi – fungsi basis orbital atom, φ_i adalah fungsi basis orbital atom dan c_i adalah koefisien fungsi basis orbital atom. Dan jika mengkombinasi linear semua atom dengan pendekatan LCAO maka:

$$\sum_i \hat{H} c_i \varphi_i(x) = \sum_i E c_i \varphi_i(x) \quad (2.3)$$

Dimana E adalah:

$$E = \frac{\int \varphi \hat{H} \varphi dv}{\int \varphi \varphi dv} = \frac{\sum_{i,j} c_i c_j H_{ij}}{\sum_{i,j} c_i c_j S_{ij}} \quad (2.4)$$

Pada persamaan (2.4) komponen yang berada di atas merupakan elemen matriks $\hat{H}_{ij}$ dan komponen di bawahnya merupakan matriks *overlap* S_{ij} sehingga dengan demikian energi tersebut harus diminimalisasi terhadap semua koefisien c_i dengan cara :

$$\frac{\delta E}{\delta c_i} = 0; \quad i = 1, 2, 3 \dots n \quad (2.5)$$

Maka akan diperoleh:

$$\sum_{i=1}^n (H_{ij} - E S_{ij}) c_i = 0 \quad i, j = 1, 2, 3 \dots n \quad (2.6)$$

Fungsi basis set STO-6G pada persamaan 2.1 digunakan untuk menghitung matriks *overlap* S_{ij} . Untuk elemen matriks H_{ij} diaproksimasi menggunakan persamaan:

$$H_{ij} = 0,5 K (H_{ii} + H_{jj}) S_{ij} \quad (2.7)$$

Berdasarkan hasil perhitungan teoritik bahwa harga konstanta K adalah 1,75 karena menghasilkan koordint atom yang presisi untuk berbagai atom. Dan untuk elemen matriks H_{ii} dan H_{jj} dipilih sebagai VSIE orbital atom [24,25]. Setelah mendapatkan komponen matriks S_{ij} , H_{ii} dan H_{jj} maka selanjutnya dapat menentukan matriks H_{ij} sesuai persamaan (2.7). Perhitungan energi gap kluster a-SiQD dihitung dengan menggunakan aplikasi ArgusLab, namun tidak semua file *crystal coordinate* dikenali oleh ArgusLab termasuk juga cif. Maka dari itu model kluster a-SiQD yang telah dibuat tersebut yang semula berekstensi cif dirubah menjadi file berekstensi xyz, yaitu jenis ekstensi yang dikenali oleh ArgusLab dengan bantuan aplikasi GDIS. File xyz ini juga jenis ekstensi berisi koordinat atomik kristal di titik x, y dan z yang kemudian dijalankan oleh aplikasi ArgusLab dalam perhitungan energi gap menggunakan EHT. Sedangkan perhitungan energi orbital molekul a-SiQD dengan metode EHT terdapat beberapa langkah, seperti memilih koordinat atom kluster a-SiQD, memilih *Basis Set* untuk perhitungan orbital molekul, perhitungan elemen matriks *overlap* yang digunakan selanjutnya untuk melakukan perhitungan elemen matriks Hamiltonian, terakhir adalah nilai eigen dan vektor eigen matriks orbital molekul dengan melakukan teknik diagonalisasi ortogonal. Proses *data fitting* atau validasi data antara data energi hasil perhitungan menggunakan metode EHT dengan hasil eksperimen yang telah dikerjakan. Energi gap E untuk pengurungan 3D a-SiQD sesuai dengan *Effective Mass Approximation* (EMA) dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$E \text{ (eV)} = E_{bulk} + \frac{c}{d^2} \quad (2.8)$$

dimana E_{bulk} adalah energi a-Si, d adalah pengaruh *dot size* dan c parameter *confinement*. Gambar 2 adalah hasil eksperimen energi gap yang terdiri dari 5 sampel data. Data pada gambar 2 paling sesuai dicocokkan dengan persamaan:

$$E \text{ (eV)} = 1,56 + \frac{2,40}{d^2} \quad (2.9)$$

Nilai pencocokkan E_{bulk} sebesar 1,56 sesuai dengan nilai literatur *bulk* a-Si yaitu berkisar 1,5 - 1,6 eV. Selain itu, Dibuat model klaster a-SiQD yang ukurannya lebih kecil dari kelima data hasil eksperimen, hasil eksperimen dibuat pada rentang 1,4 – 2,4 nm [8,9], sedangkan pada penelitian ini model klaster a-SiQD dapat dibuat dengan diameter kurang dari 1 nm. Hal ini kemudian dapat dijadikan untuk memprediksi kurva energi gap a-SiQD dan sekaligus membantu menjelaskan karakteristik energi gap pada a-SiQD.

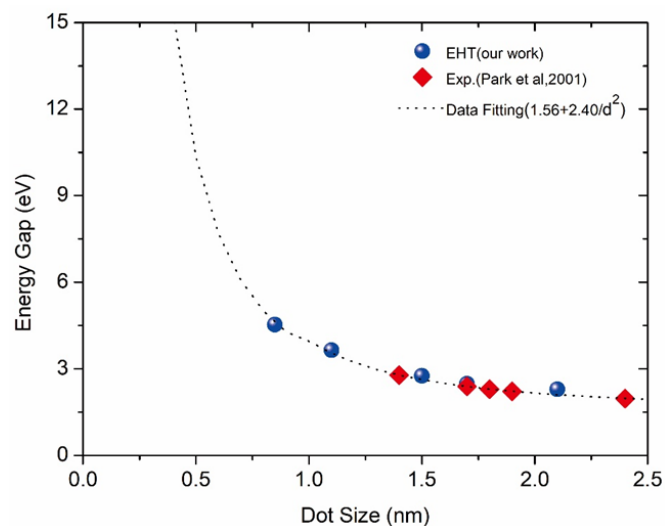
3. Hasil dan Pembahasan

Variasi diameter model klaster a-SiQD pada penelitian ini berukuran dari diameter 0,85 nm – 2,1 nm. Hasil perhitungan berdasarkan variasi *dot size* tersebut menunjukkan perubahan energi gap yang semakin kecil seiring semakin besarnya ukuran klaster a-SiQD.

Tabel 1. Hasil Energi Gap Klaster a-SiQD

<i>Dot Size</i> (nm)	E_{HOMO} (eV)	E_{LUMO} (eV)	ΔE_{HL} (eV)
0,85	9,094819	4,563491	4,531328
1,1	8,673197	5,021797	3,651400
1,5	7,526593	4,767178	2,759415
1,74	7,324990	4,849932	2,475058
2,1	7,046257	4,759146	2,287111

Tabel 1 di atas menunjukkan bahwa nilai energi gap HOMO – LUMO ditentukan oleh besar kecilnya diameter model klaster. Misalkan pada ukuran diameter 0,85 nm, menghasilkan energi gap sebesar 4,53 eV dan jika ukuran klaster semakin besar misalkan pada 2,1 nm maka energi gap akan menurun yaitu sebesar 2,29 eV.



Gambar 2. Energi Gap Klaster a-SiQD

Dari gambar 2 di atas bentuk bola berwarna biru merupakan energi gap klaster a-SiQD dari diameter 0,85 – 2,1 nm dengan perhitungan menggunakan EHT, bentuk *diamond* berwarna merah merupakan energi gap a-SiQD hasil eksperimen yang didapatkan dari referensi dengan rentang diameter dari 1,4 – 2,4 nm dan garis titik – titik di atas adalah *data fitting* sesuai dengan persamaan (3.12). Hasil perhitungan energi gap dengan EHT nilainya tidak persis sama dengan hasil eksperimen, akan tetapi *trend data* menunjukkan hasil yang sama. Hal ini karena pembuatan model ukuran klaster a-SiQD tidak sama dengan ukuran hasil sintesis a-SiQD secara eksperimen, namun pada model ukuran 1,74 nm hampir mendekati a-SiQD hasil eksperimen yaitu 1,7 nm dan menghasilkan energi gap yang tidak jauh berbeda. Dan secara keseluruhan, hasil perhitungan energi gap EHT dibandingkan energi gap eksperimen mendekati hasil yang sama dan sesuai dengan teori pengurungan kuantum.

Selain itu, dengan penurunan ukuran diameter bahan mengakibatkan rapat keadaan (*density of state*) QD berubah menjadi lebih terkuantisasi sehingga energi gap bergeser ke level energi yang lebih tinggi. Akibatnya, terjadi perubahan karakteristik optik pada QD yaitu peningkatan absorpsi bahan pada daerah panjang gelombang yang lebih kecil. Dari hasil eksperimen, perubahan ukuran diameter pada bahan a-SiQD menyebabkan transisi dari absorpsi panjang gelombang merah, kuning menjadi biru dan disebut “*blue shift*” dengan mengatur energi gap dari 2,0 – 2,76 eV [8,9]. Dari gambar 2, bahwa hasil pergeseran energi gap dari bentuk a-Si *bulk* ke bentuk a-SiQD menunjukkan meningkatnya pergeseran energi gap untuk semakin kecilnya ukuran klaster. Sehingga hasil penelitian ini dengan validasi eksperimen dapat diprediksi bahwa *photoluminescence spectra* panjang gelombang hijau oleh a-SiQD dihasilkan dari model klaster a-SiQD dengan diameter 2,1 nm dengan energi gap sebesar 2,29 eV dan mengalami pergeseran energi sebesar 0,73 eV dari bentuk a-Si *bulk*, panjang gelombang biru dihasilkan oleh model klaster a-SiQD diameter 1,5 nm dengan energi gap 2,76 eV dan pergeseran energi sebesar 1,2 eV. Namun, pada penelitian ini juga dihasilkan model klaster a-SiQD untuk ukuran diameter yang lebih kecil yaitu 1,1 nm, dan 0,85 nm dengan energi gap yang semakin besar sehingga selanjutnya dapat digunakan sebagai referensi untuk memprediksi karakteristik elektronik dan karakteristik optik bahan a-SiQD.

4. Simpulan

Telah diperoleh lima model klaster a-SiQD berbentuk bulat dengan ukuran masing – masing *dot size* klaster adalah 0,85 nm, 1,1 nm, 1,5 nm, 1,74 nm dan 2,1 nm. Energi gap klaster a-SiQD untuk beragam variasi *dot size* tersebut dihitung dengan EHT dan hasilnya berturut – turut adalah 4,53 eV, 3,65 eV, 2,76 eV, 2,48 eV dan 2,29 eV. Hasilnya, semakin kecilnya ukuran *dot size* klaster a-SiQD tersebut menghasilkan energi gap orbital molekul yang semakin besar. Tidak hanya *dot size* yang berpengaruh terhadap energi gap, bentuk klaster a-SiQD juga berpengaruh terhadap perubahan energi gap. Model klaster harus dibuat secara teliti dengan memperhatikan bentuk bulat klaster, karena tidak semua bentuk klaster a-SiQD akan menghasilkan energi gap yang sesuai dengan teori. Selain itu, penambahan atom hidrogen terhadap atom silikon terluar yang tidak berikatan oktet juga mempengaruhi energi gap klaster a-SiQD. Ketika terdapat atom silikon terluar yang tidak berikatan stabil dan tidak ditambahkan atom hidrogen, maka energi gap akan berubah.

Daftar Pustaka

1. Brus, Louis. 1984. *Electron-electron and electron-hole interactions in small semiconductor crystallites: the size dependence of the lowest excited electronic state*. Journal Chem. Phys. Vol. 80. pp.4403–4409.
2. Brus, Louis. 1986. *Electronic wave functions in semiconductor clusters: experiment and theory*. Journal Phys. Chem. Vol. 90. No. 12. pp.2555–2560.

3. Arthur, Ekpekpoko and Lucky, Akpojivi. 2013. *Synthesis and Characterization of Cds and Cdse Quantum Dots by UV-VIS Spectroscopy*. Jeteas. Vol. 4. No. 2. pp.273-280.
4. Acharya, Aurobinda., Sahu, Sarmistha., Balamurgan, Selvaraju., Sankar, Gouri. 2017. *Effect of Doping on Nano Cadmium-Selenide (CdSe) Assessment Through UV-VIS Spectroscopy*.
5. Hideki, Ooba. 2006. *Synthesis of Unique High Quality Fluorescence Quantum Dots for the Biochemical Measurements*. Aist Today. Vol. 6. No. 6. pp.26-27.
6. Bera, D., Qian, L., Tseng, T., Holloway, P. 2010. *Quantum Dots and Their Multimodal Applications*. A Review Materials. Vol. 3. pp.2260-2345.
7. Murphy, Catherine., Jeffery, Coffey. 2002. *Quantum Dots: A Primer*. Applied Spectrosc. Vol. 56. pp.16A-27A.
8. Park, N., Kim, T., Park, T. 2001. *Band Gap Engineering of amorphous silicon quantum dots for LightEmitting Diodes*. Applied Physics Letters. Vol. 78. No. 17. pp.2575-2577.
9. Park, Nae Man., Choi, Chel Jong., Seong, Tae Yeon., Park, Seong Ju. 2001. *Quantum Confinement in Amorphous Silicon Quantum Dots Embedded in Silicon Nitride*. Physical Review Letter. Vol. 86. No. 7. pp.1355-1357.
10. Ramachandran., Deepa, G., Namboori, K. 2008. *Computational Chemistry and Molecular Modeling: Principles and Applications*. Heidelberg: Springer.
11. Xia, Y., Yang, P., Sun, Y., Mayers, B., Gates, B., Yin, Y., Kim, F., Yan, H. 2003. *One Dimensional Nanostructures: Synthesis Characterization and Application*. Advances materials. Vol. 5. pp.353.
12. Rao, R., Thomas, J., Kulkarni U. 2007. *Nanocrystal: Synthesis, Properties and Applications*. Springer. Vol. 8. pp.182.
13. Charles, P., Frank, Poole., Owens, J. 2003. *Introduction to Nanotechnology*. USA: Wiley-Interscience Publication.
14. Mai, Phuong., Reinhard, Gerhard., Suraud, Eric. 2014. *An Introduction to Cluster Science*. Singapore: Markono Print Media.
15. Elliott, D. 2010. Acta Cryst B. Vol. 66. pp-271-279.
16. Kittel, Charles. 2005. *Introduction to Solid State Physics 8th ed*. USA: John Wiley & Sons.
17. Koga, J., Nishio, K., Yamaguchi, T., Yonezawa, F. 2001. *Tight-Binding Electronic State Calculations of Silicon Nanostructures with local Disorders: Origin of the F Band Luminescence From Porous Silicon*. Journal of the Physical Society of Japan. Vol. 70. No. 8. pp.2478-2484.
18. Batu, Ghosh and Naoto, Shirahata. 2014. *Colloidal silicon quantum dots: synthesis and luminescence tuning from the near-UV to the near-IR range*. Sci. Tech. Adv. Matter. Vol.15. pp-14.
19. Siregar, Rustam E. 2009. *Mekanika Kuantum Molekul*. Bandung: Jurusan Fisika FMIPA UNPAD.
20. Hoffmann, R. 1963. *An Extended Hückel Theory. I. Hydrocarbons*. Journal Chem. Phys. Vol. 39. No. 6. pp.1397-1412.
21. Fleming and Rohl. 2005. Software GDIS, (<http://www.gdis.seul.org>)
22. Thompson, Mark. Software ArgusLab 4.0. Planaria Software LLC. Seattle, USA. (<http://www.arguslab.com>)
23. Wyckoff, R. 1963. *Silicon Crystal Structure I*. New York: Interscience Publishers.
24. John, P and Peterson, Kirk. 2006. *Quantum Chemistry: 3rd ed*. UK: Elsevier Academic Press.
25. Tjia, M dan Sutjahja. 2012. *Orbital Kuantum: Pengantar Teori dan Contoh Aplikasinya*. Bandung: Karya Putra Darwati.