

**PENGARUH MODIFIKASI SEL FOTOVOLTAIK TERHADAP
KINERJANYA DALAM MENGHASILKAN ARUS DAN TEGANGAN
DENGAN SISTEM LARUTAN ELEKTROLIT KI/KI₃**

TESIS

OLEH

RERA AGA SALIHAT

13 204 12 015



**PROGRAM PASCASARJANA
JURUSAN KIMIA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS ANDALAS
PADANG
2015**

**PENGARUH MODIFIKASI SEL FOTOVOLTAIK TERHADAP
KINERJANYA DALAM MENGHASILKAN ARUS DAN TEGANGAN
DENGAN SISTEM LARUTAN ELEKTROLIT KI/KI₃**

Oleh :

RERA AGA SALIHAT

13 204 12 015

Tesis

**Sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan masa studi
Pada Program Pascasarjana Fakultas MIPA
Universitas Andalas**

**PROGRAM PASCASARJANA
JURUSAN KIMIA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS ANDALAS
PADANG
2015**

LEMBAR PENGESAHAN

Judul Penelitian : **Pengaruh Modifikasi Sel Fotovoltaik Terhadap Kinerjanya Dalam Menghasilkan Arus dan Tegangan Dengan Sistem Larutan Elektrolit KI dan KI₃**

Nama Mahasiswa : **Rera Aga Salihat**

Nomor Buku Pokok : **1320412015**

Program Studi : **Kimia**

Tesis ini telah diuji dan dipertahankan dalam sidang Ujian Magister Sains pada Program Pascasarjana FMIPA Universitas Andalas Padang dan dinyatakan lulus pada tanggal 10 Juni 2015.

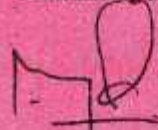
Menyetujui,

Pembimbing I



Prof. Dr. Admin Alif
NIP : 19530808 198003 1 005

Pembimbing II



Prof. Dr. Hermansyah Aziz
NIP : 19530126 197903 1 002

Koordinator Pascasarjana
Bidang Studi Kimia



Dr. Zulkarnain Chaidir
NIP : 19531111 198403 1 002

Koordinator Pascasarjana
FMIPA



Prof. Dr. Hermansyah Aziz
NIP : 19530126 197903 1 002

Dekan FMIPA
Universitas Andalas



Prof. Dr. Syafrizal Sy
NIP : 19670807 199309 1 001

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Saya menyatakan bahwa tesis yang saya tulis dengan judul **Pengaruh Modifikasi Sel Fotovoltaik Terhadap Kinerja Dalam Menghasilkan Arus dan Tegangan Dengan Sistem Larutan Elektrolit KI dan KI₂** adalah hasil karya saya sendiri dan bukan merupakan jiplakan karya orang lain, kecuali kutipan yang sumbernya dicantumkan. Jika kemudian hari pernyataan yang Saya buat ini ternyata tidak benar, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Padang, Agustus 2015

Yang Membuat Pernyataan



RERA AGA SALIHAT
No Bp. 1320412015

KATA PENGANTAR

Menghasilkan suatu penelitian yang betul-betul dapat memuaskan bagi setiap pembaca memang bukanlah hal yang mudah. Akan tetapi, berkat rahmat dan hidayah yang dikaruniakan Allah SWT, penulis dapat menyelesaikan penelitian dan penyusunan tesis dengan judul “Pengaruh Modifikasi Sel Fotovoltaik Terhadap Kinerjanya Dalam Menghasilkan Arus dan Tegangan Dengan Sistem Larutan Elektrolit KI dan KI₃”. Penyusunan tesis ini merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar Master Sains (Strata 2) pada Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Andalas.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa tesis ini tidak mungkin dapat diselesaikan dengan baik tanpa bantuan yang diberikan oleh berbagai pihak, baik secara langsung maupun tidak langsung. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih yang setulus – tulusnya kepada Bapak Prof. Dr. Admin Alif sebagai pembimbing I dan Bapak Prof. Dr. Hermansyah Aziz sebagai pembimbing II. Berikutnya, penulis mengucapkan terima kasih yang tulus kepada pihak – pihak berikut ini:

1. Kedua orang tua yang telah memberikan dukungan yang tanpa batas, baik moril maupun materil
2. Bapak Dr. Zulkarnain Chaidir sebagai Koordinator Pasca Jurusan Kimia FMIPA Unand
3. Bapak Dr. Afrizal, MS sebagai Ketua Jurusan Kimia FMIPA Unand
4. Bapak Prof. Dr. Emriadi, Bapak Dr. Syukri dan Bapak Dr. Zulhadjri sebagai penguji yang telah memberikan saran untuk perbaikan tesis ini

5. Dosen – dosen staf pengajar Jurusan Kimia FMIPA Unand yang telah memberikan ilmu dan pengetahuan kepada penulis
6. Teman – teman seperjuangan yang telah memberikan dukungan selama penelitian dan penyusunan tesis berlangsung.

Akhir kata, penulis berharap semoga tesis ini dapat berguna dan memberikan kontribusi dalam perkembangan IPTEK, terutama dalam penanganan masalah krisis energi listrik dan mengurangi ketergantungan pada energi fosil.

Padang, Juni 2015

Penulis

ABSTRAK

PENGARUH MODIFIKASI SEL FOTOVOLTAIK TERHADAP KINERJANYA DALAM MENGHASILKAN ARUS DAN TEGANGAN DENGAN SISTEM LARUTAN ELEKTROLIT KI DAN KI₃

Rera Aga Salihat (1320412015)

Dibimbing oleh Prof. Dr. Admin Alif dan Prof. Dr. Hermansyah Aziz

Penelitian mengenai pengaruh modifikasi sel fotovoltaik terhadap kinerjanya dalam menghasilkan arus dan tegangan dengan sistem larutan elektrolit KI dan KI₃ telah dilakukan. Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari pengaruh membran keramik yang dimodifikasi dengan titania (TiO₂) terhadap performa sel fotovoltaik dalam menghasilkan arus dan tegangan. Sel fotovoltaik yang dirancang memiliki ketebalan 9,5 mm. Masing – masing sel diberi kode angka (yaitu : sel 0, sel 1, sel 2, sel 3, sel 4 dan sel 5), sesuai dengan jumlah pelapisan titania terhadap membran yang digunakan. Untuk mempelajari performa sel fotovoltaik dalam menghasilkan arus dan tegangan, digunakan dua model aliran elektron pada saat pengukuran, yaitu: aliran elektron diskontinu dan kontinu. Arus dan tegangan yang dihasilkan oleh sel fotovoltaik dengan aliran elektron kontinu lebih kecil daripada aliran elektron diskontinu. Analisis SEM dan EDX membuktikan bahwa proses *dip-coating* pada membran keramik sel 5 dengan titania berhasil memodifikasi permukaan dan sekaligus memodifikasi ukuran pori dari membran keramik tersebut. Nilai – nilai parameter karakterisasi kinerja sel 5 adalah sebagai berikut: arus hubungan pendek (I_{sc}) 0,085 mA, tegangan rangkaian terbuka (V_{oc}) 80,9 mV, arus maksimum (I_{maks}) 0,025 mA, tegangan maksimum (V_{maks}) 41,8 mV, daya maksimum (P_{maks}) $1,045 \times 10^{-6}$ Watt, *Fill Factor* (FF) 0,152 dan efisiensi konversi energi (η) 0,553 %.

Kata Kunci : sel fotovoltaik, elektrolit KI/KI₃, membran keramik, titania, SEM-EDX

ABSTRACT

THE EFFECTS OF PV CELL MODIFICATION TO ITS PERFORMANCE IN GENERATING CURRENT AND VOLTAGE WITH KI/KI₃ ELECTROLYTES SYSTEM

Rera Aga Salihat (1320412015)

Master of Science in Chemistry Faculty of Mathematics and Natural Science
Andalas University

Advised by Prof. Dr. Admin Alif and Prof. Dr. Hermansyah Aziz

A research of the effect of pv cell modification to its performance in generating current and voltage with KI/KI₃ electrolytes system has been performed. This research intended on studying the effect of ceramic membranes modified with titania (TiO₂) on the performance of pv cells to generate current and voltage. The pv cells that were assembled in this study had a thickness of 9.5 mm. Each cells were given a number code (ie: cell 0, cell 1, cell 2, cell 3, cell 4 and cell 5), according to the amount of titania coating on the used membranes. To study the performance of pv cells in generating current and voltage, two models of electron flow were used at the time of measurement, they were: discontinuous flow and continuous flow of electrons. Current and voltage generated by pv cells with continuous flow of electrons were smaller than discontinuous flow of electrons. SEM and EDX analysis proved that the dip-coating process with titania on the cell 5's ceramic membrane successfully modified surface and the pore size of the ceramic membrane. The values of the performance characterization parameters of the cell 5 were as follows: short circuit current (I_{sc}) 0.085 mA, open circuit voltage (V_{oc}) 80.9 mV, maximum current (I_{max}) 0.025 mA, maximum voltage (V_{max}) 41.8 mV, maximum power (P_{max}) 1.045×10^{-6} Watt, Fill Factor (FF) 0.152 and energy conversion efficiency (η) 0.553 %.

Keywords : pv cell, KI/KI₃ electrolytes, ceramic membrane, UV-Vis spectrophotometer, SEM-EDX

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	i
KATA PENGANTAR	ii
ABSTRAK	iv
ABSTRACT	v
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	x
DAFTAR LAMPIRAN	xi
BAB I. PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Manfaat Penelitian	4
BAB II. TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Radiasi Matahari	5
2.2 Sel Fotovoltaik.....	6
2.3 Membran Keramik.....	12
2.4 Titanium Dioksida	14
2.5 Karbon	15
2.6 Larutan Elektrolit KI dan KI ₃	17
2.7 Karakterisasi Kurva I-V.....	19
2.8 Spektrofotometer UV-VIS.....	22
2.9 SEM dan EDX.....	24
BAB III. METODOLOGI PENELITIAN	26
3.1 Tempat dan Waktu Penelitian.....	26
3.2 Alat dan Bahan	26
3.3 Prosedur Kerja	27
3.3.1 Persiapan Membran Keramik	27
3.3.2 Pembuatan Sol Titania	27

3.3.3	Pembuatan Variasi Pelapisan Membran Keramik dengan TiO ₂	27
3.3.4	Preparasi Sel Fotovoltaik	28
3.3.5	Karakterisasi Membran Keramik dengan Metode SEM	28
3.3.6	Karakterisasi Membran Keramik dengan Metode EDX	28
3.3.7	Preparasi Larutan Elektrolit KI dan KI ₃	28
3.3.8	Pengukuran Arus dan Tegangan yang Dihasilkan Sel Fotovoltaik dengan Sistem Larutan Elektrolit KI dan KI ₃	29
3.3.9	Pengukuran Kestabilan Sel Fotovoltaik.....	29
3.3.10	Analisis Iodin dalam Sel Fotovoltaik dengan Metode Spektrofotometer UV-Vis	29
3.3.11	Karakterisasi Kinerja Sel Fotovoltaik.....	30
BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN		31
4.1	Rancangan Sel Fotovoltaik	31
4.2	Karakterisasi Morfologi Permukaan Membran Sel Fotovoltaik	33
4.3	Pengaruh Modifikasi Membran dengan Titania Terhadap Performa Sel Fotovoltaik dengan Aliran Elektron Diskontinu	36
4.4	Pengaruh Modifikasi Membran dengan Titania Terhadap Performa Sel Fotovoltaik dengan Aliran Elektron Kontinu.....	44
4.5	Karakterisasi Hubungan Arus Terhadap Tegangan Sel Fotovoltaik (Kurva I-V)	50
BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN.....		53
5.1	Kesimpulan.....	53
5.2	Saran	53
DAFTAR PUSTAKA.....		54
LAMPIRAN		56

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.	Spektrum cahaya matahari.....	5
Gambar 2.	Efek fotoelektrik dan efek fotovoltaiik	9
Gambar 3.	Persambungan semikonduktor tipe-n dan tipe-p	10
Gambar 4.	Absorpsi optik.....	11
Gambar 5.	Sel fotovoltaiik semikonduktor p-n ketika disinari.....	11
Gambar 6.	Struktur kristal TiO ₂	13
Gambar 7.	Struktur alotrop karbon	16
Gambar 8.	Karakteristik arus tegangan (Kurva I-V)	20
Gambar 9.	Kurva I-V yang menunjukkan arus <i>Short Circuit</i>	20
Gambar 10.	Kurva I-V yang menunjukkan tegangan <i>Open Circuit</i>	21
Gambar 11.	Skema alat spektrofotometer UV-Vis.....	23
Gambar 12.	Skema alat SEM.....	25
Gambar 13.	Skema rangkaian listrik karakterisasi sel fotovoltaiik	30
Gambar 14.	Skema sel fotovoltaiik.....	31
Gambar 15.	Hasil SEM morfologi permukaan membran keramik.....	34
Gambar 16.	Hasil analisis EDX permukaan membran keramik.....	35
Gambar 17.	Kurva pengaruh waktu pengukuran dan jumlah pelapisan membran dengan titania terhadap arus yang dihasilkan sel fotovoltaiik dengan aliran elektron diskontinu pada hari pertama.....	37
Gambar 18.	Spektrum serapan UV-Vis I ₂ dalam larutan KI sel fotovoltaiik (anoda) setelah pengukuran dengan aliran elektron diskontinu pada hari pertama	38
Gambar 19.	Kurva pengaruh waktu pengukuran dan jumlah pelapisan membran dengan titania terhadap tegangan yang dihasilkan sel fotovoltaiik dengan aliran elektron diskontinu pada hari pertama	40
Gambar 20.	Kurva pengaruh waktu pengukuran dan jumlah pelapisan membran dengan titania terhadap arus yang dihasilkan sel fotovoltaiik dengan aliran elektron diskontinu pada hari kedua	41

Gambar 21. Spektrum serapan UV-Vis I ₂ dalam larutan KI sel fotovoltaik (anoda) setelah pengukuran dengan aliran elektron diskontinu pada hari kedua.....	42
Gambar 22. Kurva pengaruh waktu pengukuran dan jumlah pelapisan membran dengan titania terhadap tegangan yang dihasilkan sel fotovoltaik dengan aliran elektron diskontinu pada hari kedua	43
Gambar 23. Kurva pengaruh waktu pengukuran dan jumlah pelapisan membran dengan titania terhadap arus yang dihasilkan sel fotovoltaik dengan aliran elektron kontinu pada hari pertama	45
Gambar 24. Spektrum serapan UV-Vis I ₂ dalam larutan KI sel fotovoltaik (anoda) setelah pengukuran dengan aliran elektron kontinu pada hari pertama.....	46
Gambar 25. Kurva pengaruh waktu pengukuran dan jumlah pelapisan membran dengan titania terhadap tegangan yang dihasilkan sel fotovoltaik dengan aliran elektron kontinu pada hari pertama	47
Gambar 26. Kurva pengaruh waktu pengukuran dan jumlah pelapisan membran dengan titania terhadap arus yang dihasilkan sel fotovoltaik dengan aliran elektron kontinu pada hari kedua.....	48
Gambar 27. Spektrum serapan UV-Vis I ₂ dalam larutan KI sel fotovoltaik (anoda) setelah pengukuran dengan aliran elektron kontinu pada hari kedua	49
Gambar 28. Kurva pengaruh waktu pengukuran dan jumlah pelapisan membran dengan titania terhadap tegangan yang dihasilkan sel fotovoltaik dengan aliran elektron kontinu pada hari kedua Hasil SEM morfologi permukaan membran keramik	50
Gambar 29. Hubungan arus dan tegangan (I-V) dalam karakterisasi kinerja sel fotovoltaik 5	52
Gambar 30. Sel Fotovoltaik.....	61
Gambar 31. Spektrum serapan UV-Vis larutan KI (Anoda) sel fotovoltaik penyinaran (awal)	61

DAFTAR TABEL

Tabel 1.	Pengaruh jumlah pelapisan membran dengan titania terhadap arus yang dihasilkan sel fotovoltaik aliran elektron diskontinu pada hari pertama.....	57
Tabel 2.	Pengaruh jumlah pelapisan membran dengan titania terhadap tegangan yang dihasilkan sel fotovoltaik aliran elektron diskontinu pada hari pertama.....	57
Tabel 3.	Pengaruh jumlah pelapisan membran dengan titania terhadap arus yang dihasilkan sel fotovoltaik aliran elektron diskontinu pada hari kedua.....	58
Tabel 4.	Pengaruh jumlah pelapisan membran dengan titania terhadap tegangan yang dihasilkan sel fotovoltaik aliran elektron diskontinu pada hari kedua.....	58
Tabel 5.	Pengaruh jumlah pelapisan membran dengan titania terhadap arus yang dihasilkan sel fotovoltaik aliran elektron kontinu pada hari pertama.....	59
Tabel 6.	Pengaruh jumlah pelapisan membran dengan titania terhadap tegangan yang dihasilkan sel fotovoltaik aliran elektron kontinu pada hari pertama.....	59
Tabel 7.	Pengaruh jumlah pelapisan membran dengan titania terhadap arus yang dihasilkan sel fotovoltaik aliran elektron kontinu pada hari kedua.....	60
Tabel 8.	Pengaruh jumlah pelapisan membran dengan titania terhadap tegangan yang dihasilkan sel fotovoltaik aliran elektron kontinu pada hari kedua.....	60
Tabel 9.	Hubungan arus dan tegangan dalam karakterisasi kinerja sel 5	62

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Penentuan Berat KI dan I ₂ yang Digunakan Sebagai Elektrolit	56
Lampiran 2. Intensitas Matahari Rata-Rata Aliran Elektron Diskontinu Hari Pertama	57
Lampiran 3. Intensitas Matahari Rata-Rata Aliran Elektron Diskontinu Hari Kedua	58
Lampiran 4. Intensitas Matahari Rata-Rata Aliran Elektron Kontinu Hari Pertama	59
Lampiran 5. Intensitas Matahari Rata-Rata Aliran Elektron Kontinu Hari Kedua	60
Lampiran 6. Penentuan Daya Maksimum, Intensitas Matahari, <i>Fill Factor</i> dan Efisiensi Konversi	63

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kebutuhan energi dunia terus meningkat seiring dengan tingkat kemajuan peradaban umat manusia. Pemanfaatan sumber energi konvensional seperti batubara, bahan bakar minyak, gas alam dan lain-lain di satu sisi memiliki biaya operasional murah, namun di sisi lainnya menghadapi kendala yang semakin besar. Kendala tersebut adalah sumbernya yang semakin berkurang dan yang lebih penting lagi munculnya persoalan polusi lingkungan hidup yang membahayakan bagi kehidupan umat manusia itu sendiri. Oleh karena itu, pengembangan sumber energi alternatif yang terbarukan dan bebas polusi menjadi kebutuhan mendesak bagi seluruh umat manusia (Thiyagu et al., 2012). Sumber-sumber energi terbarukan tersebut seperti energi surya, energi angin, energi air dan lain-lain (Ariswan, 2010).

Energi surya adalah sumber energi yang tidak akan pernah habis ketersediaannya (energi matahari yang mencapai atmosfer bumi adalah sekitar 10^{18} kWh/tahun). Matahari memancarkan energi dalam bentuk gelombang elektromagnetik dengan rentang spektrum panjang gelombang antara 250 nm sampai 2500 nm. Spektrum panjang gelombang yang cukup panjang tersebut memungkinkan direalisasikan berbagai piranti-piranti yang bekerja pada panjang gelombang tertentu. Salah satu piranti untuk mengubah energi surya menjadi energi listrik disebut sel surya/fotovoltaik.

Sel surya atau *solar cell* sejak tahun 1970-an telah mengubah cara pandang manusia tentang energi dan memberi jalan baru untuk memperoleh energi listrik tanpa perlu menggunakan bahan bakar fosil. Sel fotovoltaik juga menarik perhatian karena biayanya yang murah dan merupakan perangkat penghasil energi yang fleksibel (Liu et al., 2014). Sel fotovoltaik adalah suatu sistem konversi energi cahaya menjadi energi listrik secara langsung. Sel fotovoltaik ini bekerja berdasarkan efek fotovoltaik di mana foton dari radiasi matahari diserap oleh suatu zat kemudian diubah menjadi energi listrik. Sel fotovoltaik juga mampu beroperasi dengan baik di hampir seluruh belahan bumi yang tersinari matahari tanpa menghasilkan polusi yang dapat merusak lingkungan sehingga lebih ramah lingkungan (Dewi and Antonov, 2013).

Indonesia terletak di sepanjang garis khatulistiwa sehingga sumber-sumber energi terbarukan sangat melimpah. Oleh karena itu, pengembangan pemanfaatan energi tersebut semestinya harus dilakukan baik dalam bentuk riset di laboratorium maupun terapannya berupa teknologi tepat guna yang langsung dapat dimanfaatkan oleh masyarakat. Dalam hal energi surya, Indonesia menerima radiasi energi harian rata-rata sebesar $4,8 \text{ kW/m}^2$. Memang lebih kecil bila dibandingkan dengan Australia tengah, Amerika tengah dan sebagian negara Eropa (lebih dari 6 kW/m^2) atau Arab Saudi, Mesir dan beberapa negara di Afrika (5.5 kW/m^2). Namun Indonesia menerima radiasi sepanjang tahun dengan waktu siang tahunan lebih panjang dibandingkan negara-negara sub tropis tersebut. Namun demikian, pemanfaatan energi tersebut belum dilakukan secara optimal baik dalam bidang riset maupun terapannya (Ariswan, 2010).

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Diana (2013), sel fotovoltaik dimodifikasi menggunakan sistem aliran kontinu dengan membran keramik sebagai pemisah. Hasil penelitian ini menunjukkan arus yang tinggi namun kestabilan selnya masih rendah yaitu hanya bertahan 6 hari. Hal ini disebabkan karena I_2 di katoda berdifusi ke anoda yang menyebabkan I_2 ini mengikat elektron yang berada di anoda. Terjadinya difusi I_2 disebabkan karena pori membran yang besar (Vanika et al., 2013). Penelitian lanjutan dilakukan oleh Samsidar (2014), membran keramik dimodifikasi dengan titania (TiO_2) dengan tujuan memperkecil pori membran. Arus, tegangan dan kestabilan yang dihasilkan dari sel fotovoltaik ini lebih besar dari pada sel yang sebelumnya. Namun belum ditemukan kondisi optimum untuk penggunaan titania sebagai *support* bagi membran. Ke dua penelitian di atas menggunakan sel dengan ketebalan ± 8 cm.

Oleh karena itu, dilakukan penelitian untuk menemukan dan merancang sel fotovoltaik yang lebih tipis. Serta, untuk mempelajari pengaruh modifikasi titania terhadap kinerja dari keramik sebagai membran dalam sel fotovoltaik dengan menggunakan larutan KI dan KI_3 sebagai elektrolitnya.

1.2 Perumusan Masalah

Permasalahan yang melatarbelakangi penelitian ini adalah:

1. Bagaimana pengaruh modifikasi membran keramik terhadap arus, tegangan dan kestabilan sel fotovoltaik?
2. Bagaimana pengaruh waktu pengukuran terhadap arus, tegangan dan kestabilan sel fotovoltaik?
3. Bagaimana pengaruh modifikasi membran terhadap efisiensi sel fotovoltaik yang dihasilkan?

1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk :

1. Untuk mengetahui dan mempelajari pengaruh membran keramik yang dimodifikasi dengan TiO_2 dalam menghasilkan arus, tegangan dan kestabilan pada sel fotovoltaik.
2. Untuk mempelajari pengaruh waktu pengukuran terhadap arus, tegangan dan kestabilan sel fotovoltaik.
3. Untuk mengetahui efisiensi (performa) dari sel fotovoltaik.

1.4 Manfaat Penelitian

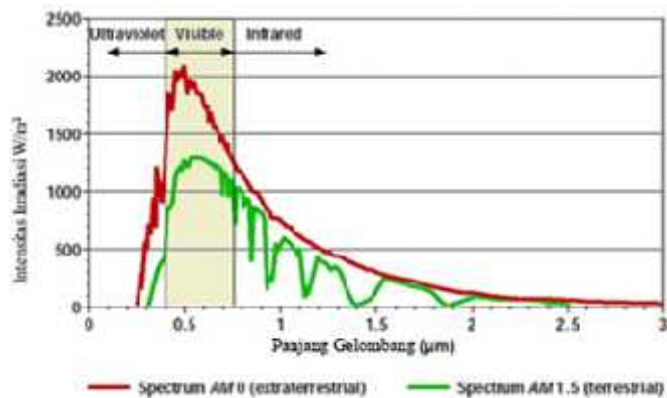
Penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi yang berguna bagi pembaca maupun peneliti dalam memanfaatkan sumber daya alam untuk menghindari krisis energi listrik dan mengurangi ketergantungan pada energi fosil dengan menggunakan sel fotovoltaik yang dapat mengubah energi surya menjadi energi listrik sebagai energi alternatif terbarukan di masa yang akan datang.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Radiasi Matahari

Matahari adalah salah satu bintang yang merupakan sumber energi utama bagi kehidupan di bumi. Sumber energi matahari berasal dari reaksi fusi atom-atom hidrogen menjadi helium. Tekanan dan suhu yang sangat tinggi akan mengubah inti hidrogen menjadi helium dan menghasilkan energi yang sangat besar, sehingga temperatur inti matahari mencapai kira-kira 15 juta Kelvin (Ariswan, 2010). Energi tersebut dipancarkan sampai ke bumi dalam bentuk satuan gelombang elektromagnetik. Spektrum panjang gelombang pancaran energi matahari ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Spektrum Cahaya Matahari

Spektrum panjang gelombang cahaya matahari akan menentukan beberapa jenis teknologi konversi energi yang sesuai. Teknologi yang dimaksud adalah pembuatan piranti-piranti berbasis energi matahari. Konversi energi matahari menjadi energi lain secara umum dapat dibedakan menjadi tiga proses terpisah, yakni proses *heliocemical*, *heliothermal* dan *helioelectrical* (Culp, 1984). Proses

heliocemical terjadi pada proses fotosintesis. Proses ini merupakan sumber dari semua bahan bakar fosil. Proses *heliothermal* adalah penyerapan (absorpsi) radiasi matahari dan secara langsung dikonversi menjadi energi termal, sedangkan proses *helioelectrical* yang utama adalah produksi listrik oleh sel-sel surya dan disebut juga efek fotovoltaiik.

2.2 Sel Fotovoltaiik

Ada kebutuhan yang jelas untuk menemukan sumber energi yang murah, mudah diakses dan ramah lingkungan, sambil memastikan produknya tidak berkontribusi terhadap perubahan iklim dunia yang lebih lanjut. Dari semua pilihan yang tersedia, fotovoltaiik menawarkan probabilitas tertinggi memberikan perubahan yang berarti dan berkelanjutan dalam cara masyarakat untuk menghasilkan energi (Alturaif et al., 2014).

Sel fotovoltaiik merupakan sebuah sistem yang dapat mengkonversi energi surya menjadi energi listrik. Sel fotovoltaiik menghasilkan energi listrik dari cahaya matahari langsung melalui beberapa tahap proses konversi energi (Dou et al., 2013). Cahaya merupakan kumpulan energi yang disebut foton, di mana energinya tergantung pada frekuensi atau warna cahaya. Spektrum matahari meliputi daerah panjang gelombang UV sampai infra merah. Hanya 30% energi cahaya yang datang berada pada daerah sinar tampak, sementara lebih dari 50% berada pada daerah infra merah (Kim, 2009).

Efek fotovoltaiik ditemukan pada tahun 1839 oleh Edmund Becquerel, seorang ahli fisika Perancis yang bereksperimen dengan sel elektrolisis yang terbuat dari dua elektroda logam. Becquerel menemukan bahwa material tertentu

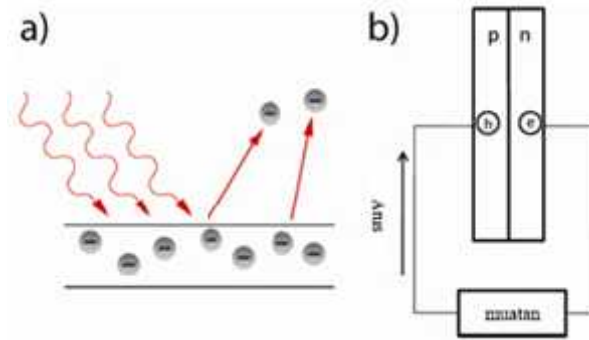
menghasilkan arus listrik dalam jumlah yang kecil ketika dikenai cahaya. Pada tahun 1905, Einstein menjelaskan efek fotoelektrik, yang menjadi dasar bagi pemahaman teoritis efek fotovoltaik, namun masih sebatas eksperimen di laboratorium (Kim, 2009). Pada tahun 1950an, sel fotovoltaik diaplikasikan untuk pertama kalinya. Pada tahun 1954, Bell Labs menciptakan sel fotovoltaik menggunakan material kristal silikon dengan p-n *junction* dan memiliki efisiensi konversi sekitar 6% (Lorenzo, 1984). Selain terbuat dari silikon, pada saat itu, sel PV juga dibuat dari kadmium sulfida, gallium arsenida, kadmium telurida dan indium fosfida. Namun, setiap teknologi tersebut memiliki kekurangannya masing-masing. Contohnya, sel PV CdS dan CdTe bersifat toksik, sel PV GaAs memiliki biaya produksi yang sangat mahal dan sel PV InP yang sangat terbatas dan langka. Oleh karena itu, sel PV silikon dianggap sebagai teknologi PV yang paling menjanjikan (Anderson, 2001).

Selanjutnya pada 1970, ketika dunia dihadapkan dengan krisis energi, penelitian mengenai sel fotovoltaik dengan efisiensi yang tinggi dilakukan secara intensif dan diharapkan dapat menjadi energi alternatif pengganti bahan bakar fosil (Pietruszka et al., 2014). Hasilnya, pada tahun 1979 telah dibangun pusat listrik tenaga surya hingga mencapai 1 MWatt. Kebutuhan sumber energi dunia dengan proses nir polutan terus diperlukan, sehingga perkembangan listrik energi surya terus berkembang terutama di negara-negara maju. Pada tahun 1995 telah dibangun listrik energi surya sampai 500 MWatt dan sampai dengan tahun 2000 telah dibangun hingga mencapai 1 GWatt. Dewasa ini, listrik energi surya menjadi energi yang sangat menjanjikan, karena harganya yang semakin terjangkau, terbarukan

dan yang lebih penting lagi energi surya merupakan sumber energi nir polutan (Ooyama and Harima, 2012).

Ketika permukaan sebuah logam disinari foton pada daerah UV, elektron akan keluar dari permukaan logam tersebut karena energi eksitasi dari sinar datang. Kemudian, elektron tersebut akan menuju atmosfer. Dalam kebanyakan kasus, ketika menyerap foton, suatu material akan melepaskan elektronnya dari keadaan dasar menuju keadaan eksitasi, kemudian elektron yang tereksitasi tersebut akan kembali relaksasi menuju keadaan dasar. Akan tetapi, dalam perangkat fotovoltaik, elektron yang tereksitasi dan *hole* yang berada di keadaan dasar harus dikumpulkan secara terpisah untuk menghasilkan energi (Kim, 2009).

Ketika seberkas cahaya dikenakan pada logam, ada elektron yang keluar dari permukaan logam. Gejala ini disebut efek fotolistrik/voltaik (Malvino, 1986). Efek fotolistrik diamati melalui prosedur sebagai berikut. Dua buah pelat logam (lempengan logam tipis) yang terpisah ditempatkan di dalam tabung hampa udara. Di luar tabung, kedua pelat ini dihubungkan satu sama lain dengan kawat. Mula-mula tidak ada arus yang mengalir karena kedua plat terpisah. Ketika cahaya yang sesuai dikenakan kepada salah satu pelat, arus listrik terdeteksi pada kawat. Ini terjadi akibat adanya elektron-elektron yang lepas dari satu pelat dan menuju ke pelat lain secara bersama-sama membentuk arus listrik. Hasil pengamatan terhadap gejala efek fotolistrik memunculkan sejumlah fakta yang merupakan karakteristik dari efek fotolistrik.

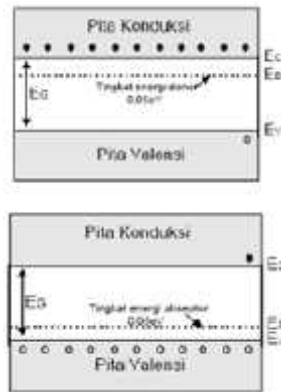


Gambar 2. a) Efek fotoelektrik dan b) Efek fotovoltaik

Sel surya atau yang disebut juga fotovoltaik adalah perangkat semikonduktor yang dapat mengubah energi matahari secara langsung menjadi energi listrik DC (arus searah) dengan menggunakan kristal Si (silikon) yang tipis. Sebuah kristal silindris Si diperoleh dengan cara memanaskan Si dengan tekanan yang diatur sehingga Si berubah menjadi penghantar. Bila kristal silindris itu dipotong setebal 0,3 mm, akan terbentuklah sel-sel silikon yang tipis atau yang disebut juga dengan sel surya (fotovoltaik). Sel-sel silikon itu dipasang dengan posisi sejajar atau seri dalam sebuah panel yang terbuat dari alumunium atau baja anti karat dan dilindungi oleh kaca atau plastik. Kemudian pada tiap-tiap sel itu diberi sambungan dengan potensial yang berbeda yang disebut dengan daerah deplesi/pengosongan (Dewi and Antonov, 2013). Bila sel-sel itu terkena sinar matahari maka pada sambungan itu akan mengalir arus listrik. Besarnya arus listrik itu tergantung pada jumlah energi cahaya yang mencapai silikon dan luas permukaan sel.

Saat ini telah dikenal berbagai struktur sel fotovoltaik berdasarkan fenomena persambungan semikonduktor (*semiconductor junction*), khususnya pada semikonduktor ekstrinsik tipe-n dan tipe-p (Maddu et al., 2007). Untuk menjelaskan mekanisme konversi energi cahaya menjadi energi listrik menggunakan piranti sel PV, maka harus ditinjau melalui fenomena persambungan semikonduktor *p-n* (p-n

junction). Pada semikonduktor tipe-n pembawa mayoritasnya adalah elektron yang berasal dari atom-atom donor dan terakumulasi pada pita donor E_d yang berada sedikit di bawah pita konduksi E_c , sedangkan pada semikonduktor tipe-p pembawa mayoritasnya adalah *hole* yang berasal dari atom-atom akseptor yang berada sedikit di atas pita valensi E_v (lihat gambar 3).

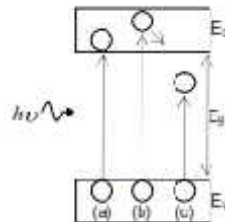


Gambar 3. Persambungan semikonduktor tipe-n dan tipe-p

Transisi dasar dari semikonduktor diperlihatkan pada gambar 4. Ketika semikonduktor disinari maka foton diserap kemudian terbentuk pasangan elektron-*hole* seperti terlihat pada proses (a) jika $h\nu = E_g$. Pada proses (b), ketika $h\nu > E_g$ maka pasangan elektron-*hole* terbentuk dan tambahan energi diubah dalam bentuk panas. Proses (a) dan (b) dinamakan transisi intrinsik (transisi *band to band*). Pada proses (c), elektron tidak memiliki energi yang cukup untuk melewati energi gap ($h\nu < E_g$) (Beiser, 1992).

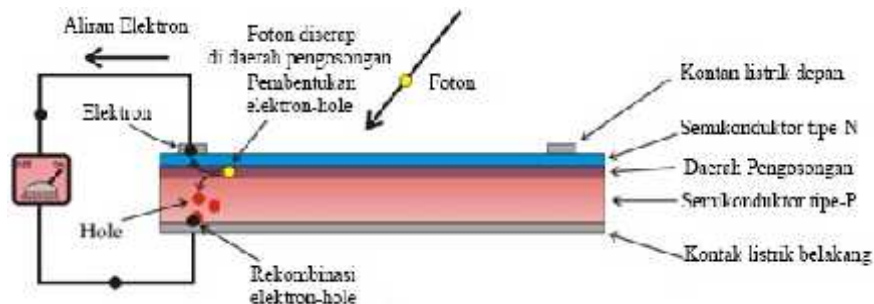
Foton dengan energi $h\nu$ datang dengan frekuensi tertentu dan mengenai daerah persambungan p-n *junction* sel fotovoltaik. Hal ini mengakibatkan adanya penyerapan (absorpsi) dari bahan semikonduktor dan pada daerah persambungan dihasilkan tipe-p dan tipe-n. Pada daerah deplesi, pembawa minoritas yakni elektron pada tipe-p dan *hole* pada tipe-n berdifusi yang diakibatkan oleh adanya

medan listrik sehingga timbul lokalisasi pada sisi-p dan sisi-n yang mengakibatkan timbulnya arus listrik (*photocurrent*) yang melewati hambatan yang terhubung pada sel surya tersebut (Maddu et al., 2007).



Gambar 4. Absorpsi optik. (a) $h\nu = E_g$, (b) $h\nu > E_g$, (c) $h\nu < E_g$,

Ketika bahan semikonduktor menyerap foton dengan energi ($h\nu$) lebih besar dari lebar celah energi (E_g) semikonduktor, maka elektron-elektron akan tereksitasi dari pita valensi ke pita konduksi dan menjadi elektron bebas (Gambar 5). Karena adanya medan elektrostatis pada persambungan, maka elektron-elektron tersebut akan menuju sisi n (pada pita konduksi), sedangkan *hole-hole* yang ditinggalkan pada level valensi akan mengalir ke sisi p (pada pita valensi), masing-masing menuju kontak arus. Sehingga bila dihubungkan dengan rangkaian maka muatan-muatan pembawa tersebut akan mengalir dengan arah yang berlawanan dan pada akhirnya saling berekombinasi kembali di dalam bahan semikonduktor. Aliran muatan-muatan pembawa tersebut menghasilkan arus listrik yang dapat diukur dengan alat-alat ukur listrik (Maddu et al., 2007).



Gambar 5. Sel fotovoltaik semikonduktor p-n ketika disinari.

2.3 Membran Keramik

Membran keramik merupakan tipe membran yang relatif baru karena skala komersialnya baru diperkenalkan pada pertengahan tahun 1980an oleh Membralox, USA. Membran jenis ini digunakan pada *reverse filtration* untuk larutan yang mengandung konsentrasi partikel yang tinggi. Membran keramik berpori adalah membran dengan tipe asimetrik yang memiliki ketebalan sekitar 1–3 mm. Lapisan mikrofiltrasi biasanya berukuran 10–30 μm dan oksida yang umum digunakan untuk membran adalah zirkonia (ZrO_2) dan alumina (Al_2O_3). Membran ultrafiltrasi tebalnya hanya beberapa mikrometer dan terbuat dari alumina, zirkonia, titania (TiO_2) dan ceria (CeO_2). Membran nanofiltrasi ketebalannya kurang dari 1 μm , umumnya terbuat dari zirkonia dan titania. Membran keramik kebanyakan dibuat dalam dua bentuk geometri utama : tubular dan flat. Membran keramik terutama yang berbasis palladium telah lama digunakan pada mikrofiltrasi dan ultrafiltrasi karena sifatnya yang stabil terhadap pengaruh panas, bahan kimia dan pelarut (Baker, 2004).

Kelebihan membran keramik terletak pada stabilitas termalnya yang baik, tahan terhadap senyawa kimia, degradasi biologis ataupun mikroba. Sifat-sifat tersebut menunjukkan keunggulan jika dibandingkan dengan membran yang terbuat dari senyawa polimer, dan relatif mudah untuk dibersihkan dengan *cleaning agent*. Ketahanan terhadap zat kimia menyebabkan membran keramik banyak digunakan pada bidang makanan, bioteknologi dan farmasi.

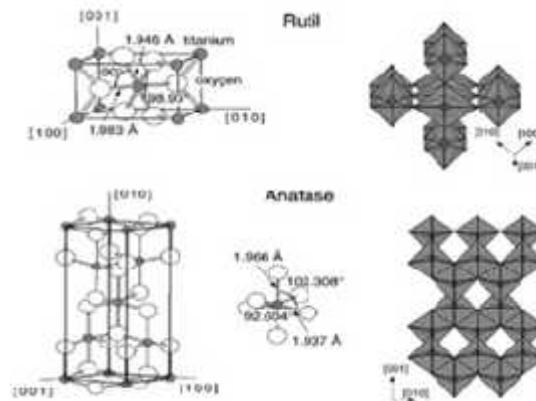
Kekurangan membran keramik terutama timbul dari proses preparasinya di mana sangat sulit mencapai kualitas produk akhir yang *reproducible*. Hal ini karena pada dasarnya sifat *brittle* dari membran keramik membuatnya lebih mahal daripada sistem membran polimer. Selain itu, harga sistem membran meningkat signifikan seiring dengan meningkatnya kebutuhan sifat-sifat produk, antara lain porositas, ukuran pori, *reproducibility*, dan *reliability*.

Umumnya, proses fabrikasi membran keramik berpori terdiri atas tiga tahapan yaitu 1) pembentukan suspensi partikel, 2) pembuatan suspensi partikel menjadi prekursor membran dengan bentuk tertentu seperti *flat-sheet*, *monolith* atau tubular dan 3) konsolidasi membran keramik dengan perlakuan panas pada suhu tinggi (Li, 2007).

Metode yang lazim dilakukan dalam pencetakan membran keramik adalah *slip casting*, *tape casting*, *extrusion* dan *pressing*. Proses pelapisan dilakukan dengan teknik *dip-coating*, sol-gel, *Chemical Vapor Deposition* (CVD) atau proses *Evaporative Vapour Deposition* (EVD). Diameter pori membran keramik untuk mikrofiltrasi dan ultrafiltrasi bervariasi dari 0,01 sampai 10 μm . Biasanya membran membran untuk mikrofiltrasi dan ultrafiltrasi dibuat dengan cara *slip coating-sintering*. Cara lainnya yaitu metode sol-gel, dapat digunakan untuk membuat membran keramik dengan ukuran pori dari 10 sampai 100 Å. Pada proses *slip coating-sintering*, membran keramik dibuat dengan cara menuangkan dispersi butir halus material keramik dan suatu *binder* dan mencetaknya dalam suatu *mold* dan selanjutnya disintering pada temperatur tinggi (Baker, 2004).

2.4 Titanium Dioksida

Titanium dioksida (TiO_2) merupakan suatu zat padat berbentuk bubuk yang berwarna putih dengan berat molekul 79,90 g/mol dengan kadar Ti 59,95 % dan kadar O 40,05 %. (Lee et al., 2008). Titanium dioksida merupakan material yang sering digunakan sebagai katalis untuk dekomposisi senyawa-senyawa organik toksik, seperti pestisida dan zat warna. TiO_2 juga merupakan salah satu katalis yang paling stabil dan lebih sering digunakan dibanding dengan katalis lainnya karena mempunyai sifat inert baik secara biologi, maupun secara kimia, memiliki *bandgap* yang luas, stabil dan tahan terhadap korosi kimia selama reaksi berlangsung (Fujishima et al., 2000, Amoli et al., 2014, Arief et al., 2008).



Gambar 6. Struktur kristal TiO_2

Titanium dioksida (TiO_2) digunakan secara luas untuk berbagai aplikasi seperti: fotokatalis, sel surya, sensor gas, dan pigmen pemutih (dalam produk cat dan kosmetik). Titanium dioksida memiliki tiga struktur kristal : rutil (tetragonal, $a = b = 4.584 \text{ \AA}$, $c = 2.953 \text{ \AA}$), anatase (tetragonal, $a = b = 3.783 \text{ \AA}$, $c = 9.502 \text{ \AA}$), dan brookite (rhombohedral, $a = 5.436 \text{ \AA}$, $b = 9.166 \text{ \AA}$, $c = 5.135 \text{ \AA}$). Struktur kristal TiO_2 dapat diamati pada Gambar 6.

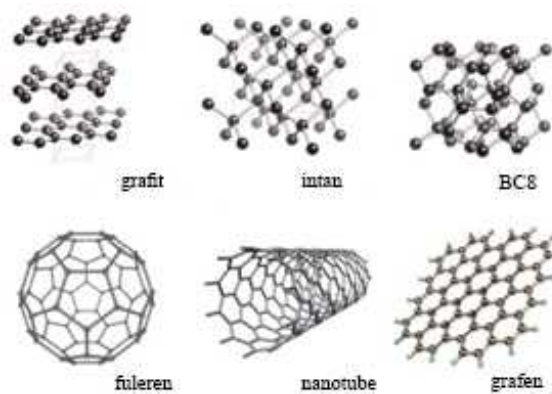
Fase anatase menunjukkan efisiensi fotokatalitik lebih besar dibanding fase lainnya, sementara brookite tidak memiliki aktivitas fotokatalitik. Struktur anatase dan rutil dapat disintesis di laboratorium, tetapi brookite sangat sulit untuk disintesis. Hal ini disebabkan karena proses pembentukan TiO₂ anatase dan rutil relatif lebih mudah daripada brookite. Bentuk kristal anatase diamati terjadi pada pemanasan serbuk Ti⁺⁴ mulai dari suhu 120 °C dan mencapai sempurna pada suhu 500 °C. pada suhu 700 °C mulai terbentuk kristal rutil dan terjadi penurunan luas permukaan serta pelemahan aktivitas katalis secara drastis.

Perbedaan struktur kristal tersebut juga mengakibatkan perbedaan tingkat energi struktur pita elektroniknya. Posisi tingkat energi pita valensi, pita konduksi, dan besar energi celah di antara keduanya akan berbeda apabila lingkungan penyusunan atom Ti dan O di dalam kristal TiO₂ berbeda, di mana struktur anatase memiliki energi gap sebesar 3,2 eV sedangkan rutil sebesar 3,0 eV (Gunlazardi, 2001, Henning et al., 2013). TiO₂ biasanya dipreparasi dalam bidang kimia sebagai material pendukung untuk diaplikasikan pada katalis, elektroda, dan film dengan menggunakan metode sol-gel (Lee et al., 2012).

2.5 Karbon

Karbon (C) merupakan unsur golongan IV A dengan nomor atom 6, memiliki konfigurasi 1s²2s²2p². Titik lelehnya mencapai 350 °C dengan massa atom relatif 12,011 g/mol. Berdasarkan alotropnya (bentuk geometrisnya), karbon terbagi menjadi lima kelas besar, yaitu: grafit, intan, *fullerene*, *carbon nanotubes*, dan amorf.

Sifat-sifat fisika karbon bervariasi tergantung pada jenis allotropnya. Sebagai contohnya, intan berwarna transparan, sementara grafit berwarna hitam dan kusam. Intan merupakan salah satu materi terkeras di dunia, sementara grafit cukup lunak untuk meninggalkan bekasnya pada kertas. Intan memiliki konduktivitas listrik yang sangat rendah, sedangkan grafit adalah konduktor listrik yang sangat baik. Di bawah kondisi normal, intan memiliki konduktivitas termal yang tertinggi di antara material lain yang diketahui. Semua allotrop karbon berbentuk padat dalam kondisi normal, tetapi grafit merupakan allotrop yang paling stabil secara termodinamik di antara allotrop-alotrop lainnya.



Gambar 7. Struktur Allotrop Karbon

Daya hantar grafit sangat dipengaruhi oleh ikatan antar karbon pada struktur molekulnya. Grafit memiliki struktur susunan atom karbon heksagonal (hibridisasi sp^2) dengan lembaran segi enam dan masing-masing atom karbon membentuk segitiga sama sisi. Karbon memiliki empat elektron valensi, tiga elektron akan membentuk ikatan kovalen dengan tiga atom tetangganya, sedangkan satu elektron lagi akan bergerak bebas. Elektron bebas inilah yang akan menimbulkan muatan listrik karena dapat menghantarkan arus elektron pada grafit (Putri et al., 2013).

Salah satu jenis elektroda kerja yang sering digunakan adalah elektroda padat. Material yang biasa digunakan sebagai elektroda padat adalah platina, emas, perak, nikel dan karbon (Wang, 2000). Hal yang paling penting untuk diperhatikan dalam penggunaan elektroda padat adalah adanya ketergantungan respon yang dihasilkan pada permukaan elektroda. Oleh karena itu, dibutuhkan perlakuan awal tertentu berdasarkan jenis materialnya untuk meningkatkan reproduibilitas dari permukaan elektroda tersebut. Ada beberapa cara untuk meningkatkan reproduibilitas dari permukaan elektroda, antara lain secara mekanik (*polishing* dengan menggunakan material abrasif), secara fisika (dengan pemanasan pada suhu tertentu dan kondisi vakum, atau dengan sonifikasi dalam pelarut tertentu) dan secara elektrokimia (dengan menggunakan *potential cycling*). Elektroda karbon memiliki kegunaan yang cukup luas dalam bidang elektroanalisis, terutama karena harganya yang relatif lebih murah, mudah diperoleh, memiliki kisaran potensial yang cukup besar, arus *background*-nya rendah, cukup stabil, inert secara kimia dan memiliki konduktivitas elektrik yang sangat baik (Tribidasari, 2008).

2.6 Larutan Elektrolit KI dan KI₃

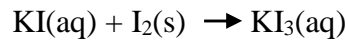
Meskipun sel fotovoltaik saat ini telah banyak tersedia secara komersial, ekspansi pasarnya masih terbatas karena penggunaan elektrolit cair (larutan), di mana kestabilannya sangat rendah disebabkan pengurangan pelarut dan erosi elektrodanya. Penggantian elektroda cair dengan medium padat merupakan salah satu solusi yang baik. Namun, dibandingkan dengan elektrolit cair, sel dengan elektrolit padat masih menghasilkan efisiensi konversi energi yang lebih kecil (Xiang et al., 2011).

Larutan elektrolit merupakan larutan yang dibentuk dari zat elektrolit. Sedangkan zat elektrolit itu sendiri merupakan zat-zat yang di dalam air terurai membentuk ion-ionnya. Zat elektrolit yang terurai sempurna di dalam air disebut elektrolit kuat dan larutan yang dibentuknya disebut larutan elektrolit kuat. Zat elektrolit yang hanya terurai sebagian membentuk ion-ionnya di dalam air disebut elektrolit lemah dan larutan yang dibentuknya disebut larutan elektrolit lemah.

Larutan elektrolit dapat menghantarkan listrik. Hal ini untuk pertama kalinya diterangkan oleh Svante August Arrhenius (1859-1927), seorang ilmuwan dari Swedia. Arrhenius menemukan bahwa zat elektrolit dalam air akan terurai menjadi partikel-partikel berupa atom atau gugus atom yang bermuatan listrik. Karena secara total larutan tidak bermuatan, maka jumlah muatan positif dalam larutan harus sama dengan muatan negatif. Atom atau gugus atom yang bermuatan listrik itu dinamai ion. Ion yang bermuatan positif disebut kation, sedangkan ion yang bermuatan negatif disebut anion. Pembuktian sifat larutan elektrolit yang dapat menghantarkan listrik ini dapat diperlihatkan melalui eksperimen. Zat-zat yang tergolong elektrolit yaitu asam, basa dan garam. Salah satu contoh larutan elektrolit kuat adalah larutan kalium iodida (KI).

Kalium iodida adalah senyawa anorganik yang berbentuk bubuk putih dan merupakan senyawa iodida yang paling banyak diperdagangkan. Dan bersifat kurang higroskopis dibandingkan natrium iodida (NaI). Kalium iodida yang sudah lama dan tidak murni lagi akan berwarna kuning karena proses oksidasi garam KI yang lambat menjadi kalium karbonat (K_2CO_3) dan iodin (I_2).

Seperti garam iodida lainnya, KI membentuk I_3^- ketika dicampurkan dengan iodin.

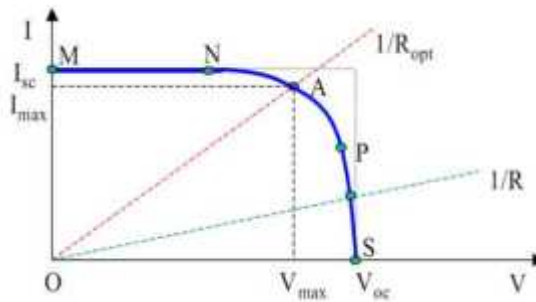


Tidak seperti I_2 , garam I_3^- sangat larut dalam air. Larutan KI_3 (larutan lugol) biasanya digunakan sebagai disinfektan dan elektrolit dalam sel surya/fotovoltaik (Diana et al., 2013).

2.7 Karakterisasi Kurva I-V

Sel fotovoltaik adalah sebuah alat non-linear sehingga untuk memahami karakteristiknya digunakan suatu grafik. Sifat elektrik dari sel fotovoltaik dalam menghasilkan energi listrik dapat diamati dari karakteristik listrik sel tersebut, yaitu berdasarkan arus dan tegangan yang dihasilkan sel fotovoltaik pada kondisi cahaya dan beban yang berbeda-beda. Kurva I-V menggambarkan sifat dari sel surya secara lebih lengkap.

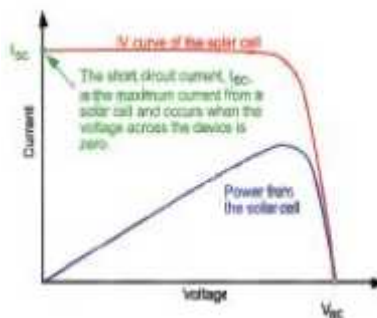
Gambar 8 menunjukkan ketika sel dihubungkan dengan beban (R). Beban memberi hambatan sebagai garis linear dengan garis $I/V = I/R$. Hal tersebut menunjukkan daya yang didapat bergantung pada nilai resistansi. Jika R kecil maka sel beroperasi pada daerah kurva MN, di mana sel beroperasi sebagai sumber arus *short circuit*. Pada sisi lain, jika R besar, sel beroperasi pada daerah kurva PS, di mana sel beroperasi sebagai sumber tegangan yang konstan atau tegangan *open circuit*. Jika dihubungkan dengan hambatan optimal R_{opt} berarti sel surya menghasilkan daya maksimal dengan tegangan maksimal dan arus maksimal.



Gambar 8. Karakteristik Arus Tegangan (Kurva I-V)

Parameter-parameter utama yang dapat ditentukan dari karakteristik sel fotovoltaik saat disinari adalah V_{oc} (*open circuit voltage* / tegangan rangkaian terbuka), I_{sc} (*short circuit current* / arus hubungan singkat), P_{max} , FF (*Fill Factor* / Faktor Pengisian), dan η (*conversion efficiency* / efisiensi konversi).

Arus hubungan singkat atau *short circuit current* (I_{sc}) adalah arus keluaran maksimum dari sel surya pada kondisi tegangan bernilai nol dan tidak ada beban (resistansi). Ini terjadi ketika jumlah carier yang dikumpulkan pada *p-n junction* bergerak kerangkaian luar, sehingga bisa dikatakan bahwa arus *short circuit* adalah arus maksimum yang dapat dihasilkan oleh sel surya (Dewi and Antonov, 2013).



Gambar 9. Kurva I-V yang Menunjukkan Arus *Short Circuit*

Arus sel surya tergantung pada beberapa faktor di antaranya (*Device Honsberg*) :

- Luas dari sel surya
- Jumlah foton (yaitu daya dari sumber cahaya yang jatuh). I_{sc} dari sel surya secara langsung bergantung pada intensitas cahaya.
- Sifat optikal (penyerapan dan pemantulan) sel surya
- Probalitas pengumpulan sel surya, yang bergantung terutama pada *surface passivation* dan *lifetime* dari *minority carrier* pada *base*.

Tegangan rangkaian terbuka atau *open circuit voltage* (V_{oc}) adalah kapasitas tegangan maksimum yang diukur ketika rangkaian sel surya dalam keadaan terbuka, sehingga tidak ada arus yang mengalir kerangkaian luar, sehingga arus bernilai nol. Tegangan *open circuit* ini merupakan tegangan terbesar yang dapat dibangkitkan oleh suatu sel surya (Dewi and Antonov, 2013).



Gambar 10. Kurva I-V yang Menunjukkan Tegangan *Open Circuit*

Faktor pengisian atau *Fill factor* (FF) merupakan harga yang mendekati konstanta sel fotovoltaik tertentu. Perbandingan antara daya maksimum yang didapat pada beban dan perkalian I_{sc} dan V_{oc} (Moller, 1993).

$$FF = \frac{I_{max} V_{max}}{I_{sc} V_{oc}}$$

Dimana I_{max} dan V_{max} adalah arus dan tegangan listrik pada titik kerja optimum, yaitu yang menghasilkan daya keluaran maksimum. Jika nilai *fill factor* lebih tinggi dari 0,7 maka sel tersebut dapat dikatakan lebih baik.

Banyaknya energi matahari dalam bentuk foton yang diserap oleh sel surya dapat ditentukan efisiensinya. Nilai efisiensi ini dihitung pada kondisi standar (irradiasi = 1000 W/m², AM 1,5 dan temperatur 25°C). Efisiensi konversi () dihitung melalui persamaan: (Moller, 1993)

$$\eta = \frac{FF Voc Isc}{P_{in}} \times 100\%$$

Dengan P_{in} adalah daya input cahaya matahari yang digunakan untuk menyinari sel fotovoltaik (Pietruszka et al., 2014).

2.8 Spektrofotometer UV-VIS

Spektrofotometer merupakan suatu metode analisis yang didasarkan pada pengukuran serapan sinar monokromatis suatu lajur larutan dengan menggunakan monokromator sistem prisma atau kisi difraksi dan detektor fotosel. Spektrofotometer adalah alat yang terdiri dari spektrofotometer dan fotometer. Spektrofotometer menghasilkan sinar dari spektrum dengan panjang gelombang tertentu dan fotometer adalah alat pengukur intensitas cahaya yang ditransmisikan atau diabsorpsi. Jadi spektrofotometer digunakan untuk mengukur energi secara relatif jika energi tersebut ditransmisikan, direfleksikan atau diemisikan sebagai fungsi gelombang (Hoffmann et al., 1995).

Radiasi elektromagnetik UV-Vis mempunyai panjang gelombang berkisar 200-750 nm. Sinar UV mulai dari 200-400 nm dan sinar tampak 400-750 nm. Absorpsi sinar akan menyebabkan terjadinya eksitasi elektron. Atom atau molekul akan mengabsorpsi sinar pada daerah panjang gelombang yang energinya sesuai dengan beda energi antara keadaan dasar dan keadaan tereksitasi dari atom atau

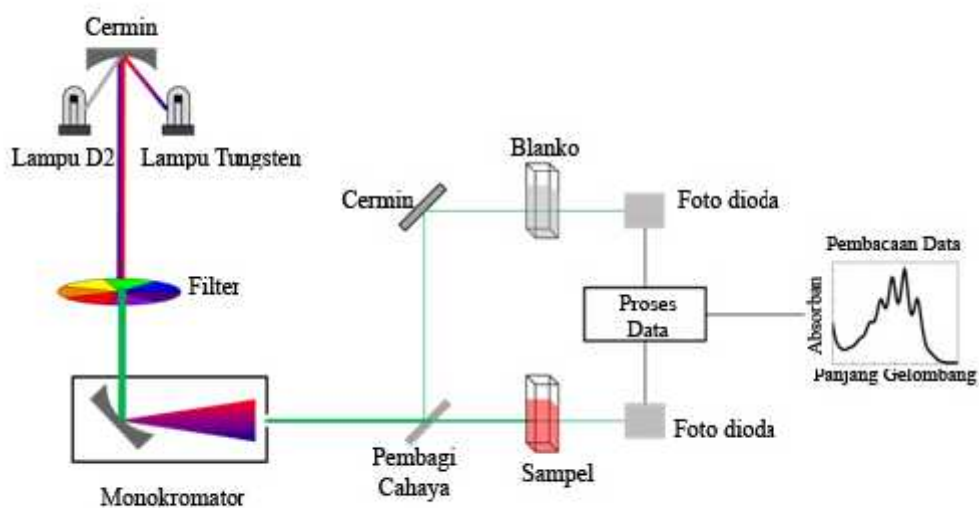
molekul tersebut. Panjang gelombang yang diabsorpsi spesifik untuk masing-masing senyawa (Hoffmann et al., 1995).

Untuk pengukuran secara kuantitatif, metode spektrofotometri UV-Vis digunakan untuk menentukan konsentrasi larutan, di mana absorpsi sinar oleh larutan merupakan fungsi konsentrasi. Pada kondisi optimum, dapat dibuat hubungan linier secara langsung antara absorpsi larutan dan konsentrasi larutan tersebut. Persamaan yang menggambarkan hubungan linier tersebut dikenal dengan hukum Lambert-Beer, yaitu:

$$A = a \times b \times c$$

Keterangan:

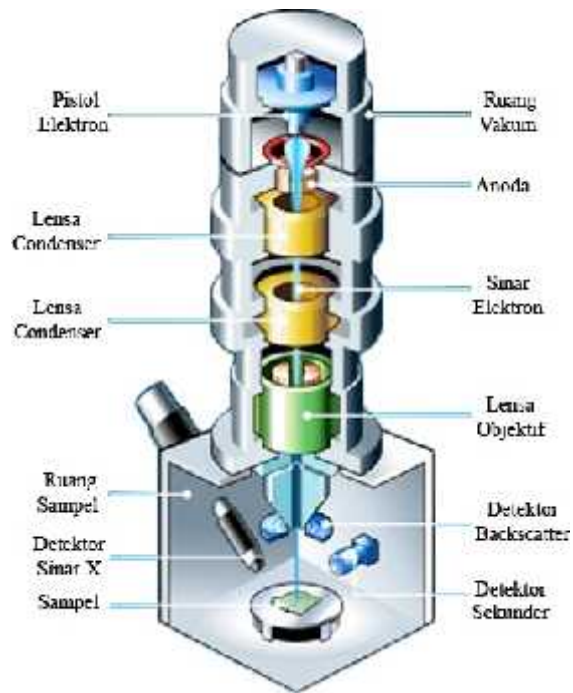
- A = absorban
- a = absorbtivitas ($\text{cm}^{-1}\text{mg}^{-1}/\text{L}^{-1}$)
- b = tebal kuvet (cm)
- c = konsentrasi analit (mg/L)



Gambar 11. Skema Alat Spektrofotometer UV-Vis

2.9 SEM (*Scanning Electron Microscope*) dan EDS (*Electron Dispersion Spectroscopy*)

Teknik SEM pada hakikatnya merupakan pemeriksaan dan analisis permukaan. Data yang diperoleh adalah data dari permukaan atau dari film yang tebalnya sekitar 20 μm dari permukaan. Gambar permukaan yang diperoleh merupakan gambar topografi dengan segala tonjolan dan lekukan permukaan. Gambar topografi diperoleh dari penangkapan pengolahan elektron sekunder yang dipancarkan oleh spesimen. Prinsip kerja SEM adalah *scanning* yang berarti bahwa berkas elektron menyapu permukaan spesimen (lihat gambar 11), titik demi titik dengan sapuan membentuk garis demi garis, mirip seperti gerakan mata yang membaca. Sinyal elektron sekunder yang dihasilkannya berasal dari titik pada permukaan yang selanjutnya ditangkap oleh detektor SE yang kemudian diolah dan ditampilkan pada layar monitor. *Scanning coil* yang mengarahkan berkas-berkas elektron bekerja secara sinkron dengan pengarah berkas elektron pada layar monitor. Sinyal lain yang penting adalah *back scattered electrons* yang intensitasnya tergantung pada nomor atom unsur yang ada pada permukaan spesimen. Dengan cara ini akan diperoleh gambar yang menyatakan perbedaan unsur kimia. Selain itu, dengan SEM kita dapat mengetahui ketebalan film tipis.



Gambar 12. Skema Alat SEM

EDX (*Electron Dispersion X-Ray Spectroscopy*) merupakan suatu alat yang berfungsi untuk mengetahui komposisi penyusun dari suatu senyawa sehingga dapat mengetahui kesesuaian dengan stokiometri pembuatannya. EDX adalah suatu alat yang dirangkai pada SEM. Radiasi yang terpenting adalah sinar-x karakteristik yang diemisikan sebagai akibat tumbukan elektron pada atom-atom sampel. Analisis dari energi terhadap cacah puncak-puncak yang muncul dapat menghasilkan informasi kualitatif dan kuantitatif mengenai komposisi penyusun pada sampel (Handayani et al., 2007).

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Foto/Elektrokimia, Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Andalas, pada bulan Agustus 2014 sampai bulan Januari 2015.

3.2 Alat dan Bahan

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah : neraca analitis, multimeter digital (HELES UX-33), penjepit buaya, lem pipa, karet berbentuk lingkaran (diameter 25 mm, ketebalan 4 mm), plastik transparan berbentuk lembaran, membran keramik (ketebalan ± 1 mm, diameter 50 mm), batang karbon (diameter 1 mm), *light meter*, Spektrofotometer UV/Vis (SPECTROstar Nano-BMG Labtech), SEM (Hitachi S-3400N), dan beberapa peralatan gelas.

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut. Titanium isopropoksida ($C_{12}H_{28}O_4Ti$), dietanolamin ($C_4H_{11}NO_2$), kalium iodida (KI) dan iodin (I_2) yang diperoleh dari Merck, Jerman. Isopropanol (C_3H_7OH) diperoleh dari Fisons, Inggris. Serta akua DM (H_2O) yang diperoleh dari BrataCo Chemika PT, Indonesia.

3.3 Prosedur Kerja

3.3.1 Persiapan Membran Keramik

Membran keramik disiapkan dari keramik lantai dengan cara menipiskan keramik tersebut menggunakan gerinda keramik. Kemudian permukaannya dihaluskan dan diratakan dengan menggunakan batu asahan sampai diperoleh membran dengan ketebalan 1 mm. Membran keramik yang disiapkan dalam penelitian ini berjumlah enam buah.

3.3.2 Pembuatan Sol Titania (TiO₂)

Proses pembuatan sol titania dilakukan dengan mencampurkan 30 mL isopropanol dengan 4 mL DEA dalam gelas piala dan diaduk dengan menggunakan stirrer kemudian dilanjutkan dengan penambahan 6 mL TIP. Pengadukan dilakukan selama kurang lebih 4 jam sehingga diperoleh sol titania.

3.3.3 Pembuatan Variasi Pelapisan Membran Keramik dengan TiO₂

Proses pelapisan membran keramik dilakukan dengan cara mencelupkan lima buah membran keramik ke dalam sol titania selama kurang lebih 20 detik. Proses dilanjutkan dengan pengeringan pelarut pada membran keramik dengan cara diuapkan di dalam oven selama kurang lebih 15 menit pada suhu 100 °C. Selanjutnya, membran keramik dikalsinasi di dalam furnace pada suhu 400 °C selama kurang lebih 1 jam.

Proses peng-*coating*-an sampai proses kalsinasi diulangi kembali untuk mendapatkan membran keramik dengan variasi pelapisan yang berikutnya. Proses ini dilakukan sampai diperoleh membran keramik dengan variasi lima kali pelapisan.

3.3.4 Preparasi Sel Fotovoltaik

Masing-masing membran keramik dirancang menjadi sel fotovoltaik. Proses perangkaian dimulai dengan menempelkan lembaran plastik pada karet dengan menggunakan lem pipa. Setelah kering, dua dari bagian karet ini ditempelkan pada membran keramik, di mana membran keramik diposisikan pada bagian tengah dari dua karet. Pada bagian atas masing-masing karet yang mengapit membran, diberi lubang sebagai tempat masuknya elektroda karbon.

3.3.5 Karakterisasi Membran Keramik dengan Metode SEM

Untuk mempelajari dan mengkonfirmasi membran keramik yang dimodifikasi dengan titania, dilakukan karakterisasi dengan menggunakan metode *Scanning Electron Microscopy* (SEM).

3.3.6 Karakterisasi Membran Keramik dengan Metode EDX

Untuk menganalisis dan mempelajari komposisi membran keramik yang dimodifikasi dengan titania, dilakukan karakterisasi dengan menggunakan metode *Electron Dispersion X-Ray Spectroscopy* (EDX).

3.3.7 Preparasi Larutan Elektrolit KI dan KI₃

Sebanyak 20,75 g KI ditimbang dan dilarutkan dengan aqua DM di dalam labu ukur 1000 mL untuk mendapatkan larutan KI dengan konsentrasi 0,125 N. Sebanyak 0,25 g I₂ dilarutkan dengan larutan KI di dalam labu ukur 250 mL untuk mendapatkan I₂ dengan konsentrasi 1000 mg/L.

3.3.8 Pengukuran Arus dan Tegangan yang Dihasilkan Sel Fotovoltaik dengan Sistem Larutan Elektrolit KI dan KI₃

Satu bagian dari sel diisi dengan larutan KI dan bagian lainnya diisi dengan larutan KI₃ dengan volume yang sama. Kemudian bagian yang berisi larutan KI dihadapkan pada sumber cahaya. Arus dan tegangan yang dihasilkan selama proses fotovoltaik berlangsung diukur menggunakan multimeter yang telah dihubungkan dengan ke dua elektroda sel fotovoltaik.

3.3.9 Pengukuran Kestabilan Sel Fotovoltaik

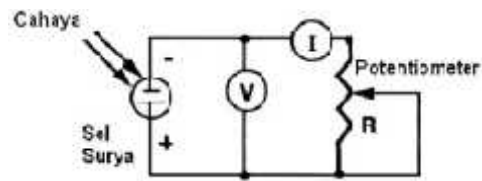
Pengujian kestabilan sel fotovoltaik dilakukan dengan cara mengukur arus dan tegangan yang dihasilkan sel fotovoltaik setiap hari dari jam 10.00 sampai jam 13.30 dengan interval waktu pengukuran 30 menit.

3.3.10 Analisis Iodin dalam Sel Fotovoltaik dengan Metode Spektrofotometer UV-Vis

Penentuan kadar senyawa iodin (I₂) dalam sel fotovoltaik setelah pengukuran arus dan tegangan, dilakukan dengan cara mengambil larutan dari ke dua sisi sel sebanyak 1 mL, masing-masing. Larutan amilum 1 % ditambahkan sebanyak dua tetes ke dalam larutan. Kemudian dilakukan pengukuran serapan larutan dengan menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang 240-750 nm.

3.3.11 Karakterisasi Kinerja Sel Fotovoltaik

Karakterisasi arus dan tegangan yang dihasilkan sel fotovoltaik dilakukan dengan menggunakan perangkat I-V. Parameter yang diukur adalah: tegangan rangkaian terbuka (V_{oc}), arus sirkuit pendek (I_{sc}), tegangan maksimum (V_{max}) dan *fill factor* (FF).



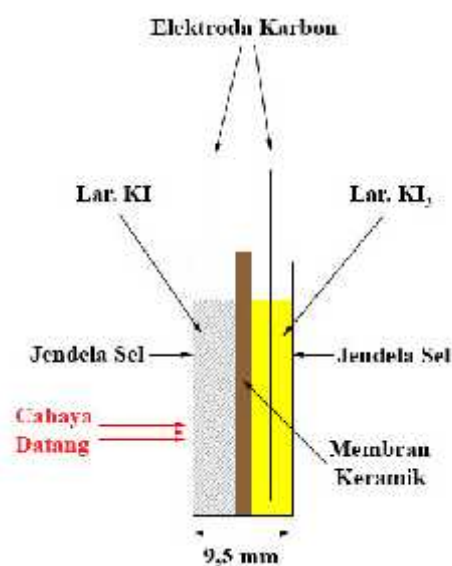
Gambar 13. Skema rangkaian listrik karakterisasi sel fotovoltaik (Hamdani et al., 2011)

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

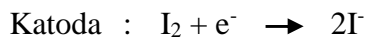
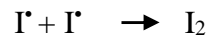
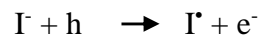
4.1 Rancangan Sel Fotovoltaik

Skema sel fotovoltaik yang digunakan dalam penelitian ini terlihat pada gambar 14 sedangkan hasil rancangannya dapat dilihat pada lampiran Gambar 30. Sel fotovoltaik yang telah dirancang ini memiliki ketebalan total 9,5 mm dengan tebal membran 1 mm. Jendela membran terbuat dari plastik transparan berbahan PVC dengan ketebalan 0,25 mm. Sedangkan elektroda karbon yang digunakan memiliki panjang 25 mm dan lebar 2,7 mm dengan luas permukaan 67,5 mm². Membran keramik yang telah dimodifikasi dengan titania berfungsi sebagai *filter* sekaligus pembatas antara ½ sel anoda dan ½ sel katoda. Bagian anoda dari sel yang berisi larutan KI merupakan bagian yang menghadap ke arah datangnya sinar matahari sementara bagian katoda sebagai wadah larutan I₂ dalam KI merupakan bagian yang menghadap berlawanan dengan datangnya sinar matahari.



Gambar 14. Skema sel fotovoltaik

Penempatan masing – masing elektrolit ini didasarkan pada reaksi – reaksi berikut.



Reaksi – reaksi di atas terjadi secara terus menerus (kontinu) ketika ke dua elektroda dihubungkan satu sama lainnya dengan menggunakan kawat tembaga. Dalam penelitian ini, reaksi tersebut diharapkan dapat berlangsung secara kontinu di mana ion I^- yang dihasilkan di katoda dapat pindah ke anoda untuk menggantikan ion I^- yang telah berubah menjadi I^\bullet karena berkontak dengan sinar matahari dalam menghasilkan elektron. Elektron akan mengalir dari anoda menuju katoda melalui kawat tembaga pada saat ke dua elektroda dihubungkan. Arus dan tegangan yang dihasilkan ini dapat diukur dengan menggunakan multimeter. Perpindahan ion I^- dari katoda ke anoda terjadi secara difusi melalui membran keramik yang membatasi ke dua bagian sel tersebut.

Sel yang digunakan dalam penelitian ini berjumlah enam sel. Bagian dari sel yang divariasikan adalah keramik yang digunakan sebagai membran pembatasnya. Membran keramik dimodifikasi dengan menggunakan titania (TiO_2) dengan tujuan memperkecil pori keramik. Pori keramik yang semakin kecil mampu menahan difusi I_2 dari katoda menuju anoda.

Untuk mempelajari performa sel fotovoltaik yang telah dirancang dalam menghasilkan arus dan tegangan, digunakan dua model aliran elektron pada saat pengukuran, yaitu: aliran elektron diskontinu dan aliran elektron kontinu. Aliran elektron diskontinu adalah keadaan sel di mana elektron hanya mengalir pada saat

pengukuran arus dan tegangan saja, saat pengukuran tidak berlangsung, elektron tidak mengalir dari anoda menuju katoda. Sementara itu, aliran elektron kontinu adalah keadaan sel di mana elektron selalu mengalir dari anoda menuju katoda selama rentang waktu pengukuran yang ditentukan.

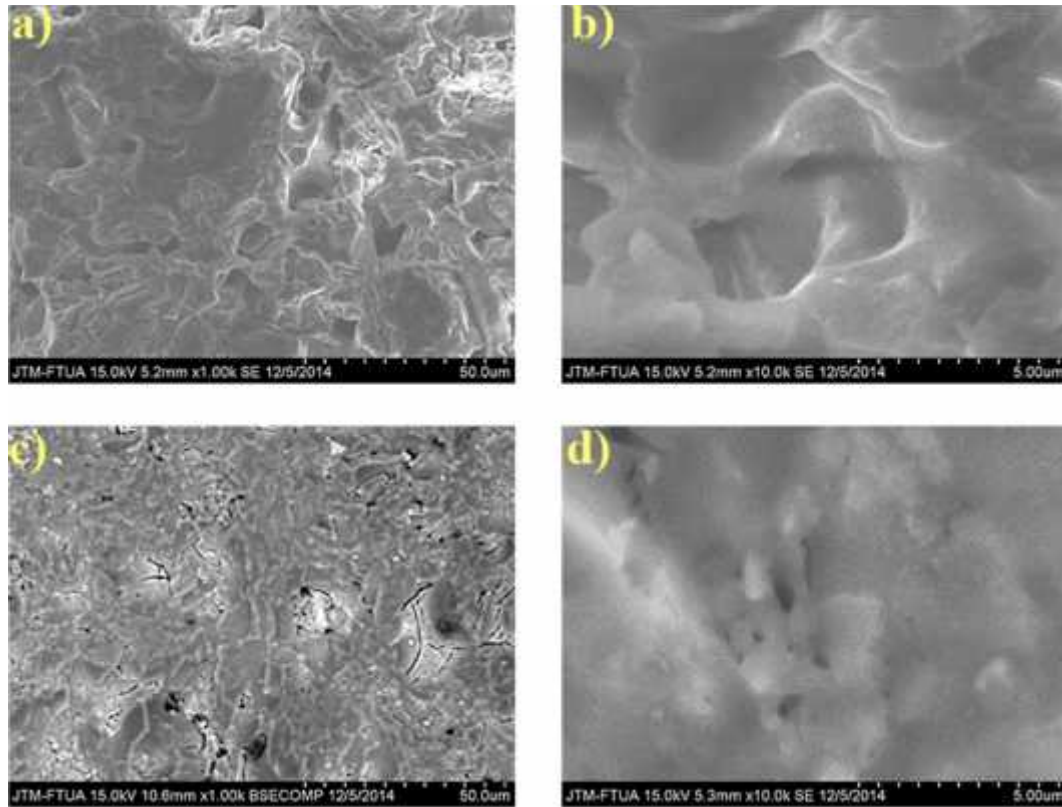
Sel-sel yang digunakan dalam penelitian ini masing – masing diberi kode angka (yaitu : sel 0, sel 1, sel 2, sel 3, sel 4 dan sel 5), sesuai dengan jumlah pelapisan titania terhadap membran yang digunakan pada masing – masing sel tersebut. Sel 0 berfungsi sebagai kontrol, di mana membran yang digunakan pada sel ini tidak dimodifikasi dengan titania. Rentang waktu yang digunakan untuk menguji performa sel fotovoltaik dalam menghasilkan arus dan tegangan adalah dari jam 10.00 sampai 13.30 dengan interval waktu pengukuran 30 menit.

4.2 Karakterisasi Morfologi Permukaan Membran Sel Fotovoltaik

Morfologi permukaan membran keramik yang digunakan pada sel 0 dan sel 5 dianalisis dengan menggunakan metode *Scanning Electron Microscopy* (SEM), seperti yang terlihat pada Gambar 15. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, sel 0 merupakan sel yang menggunakan membran yang tidak dimodifikasi dengan titania, sedangkan sel 5 adalah sel dengan membran yang telah dilapisi dengan titania sebanyak lima kali dengan teknik *dip-coating*.

Dari foto SEM pada Gambar 15, terlihat perbedaan morfologi permukaan antara membran keramik yang tidak dimodifikasi menggunakan titania (Gambar 28. a dan b) dengan membran keramik yang telah dimodifikasi menggunakan titania (Gambar 28. c dan d). Membran yang telah dimodifikasi dengan titania memiliki ukuran pori yang lebih kecil, yaitu 5-10 μm . Sedangkan membran yang tidak

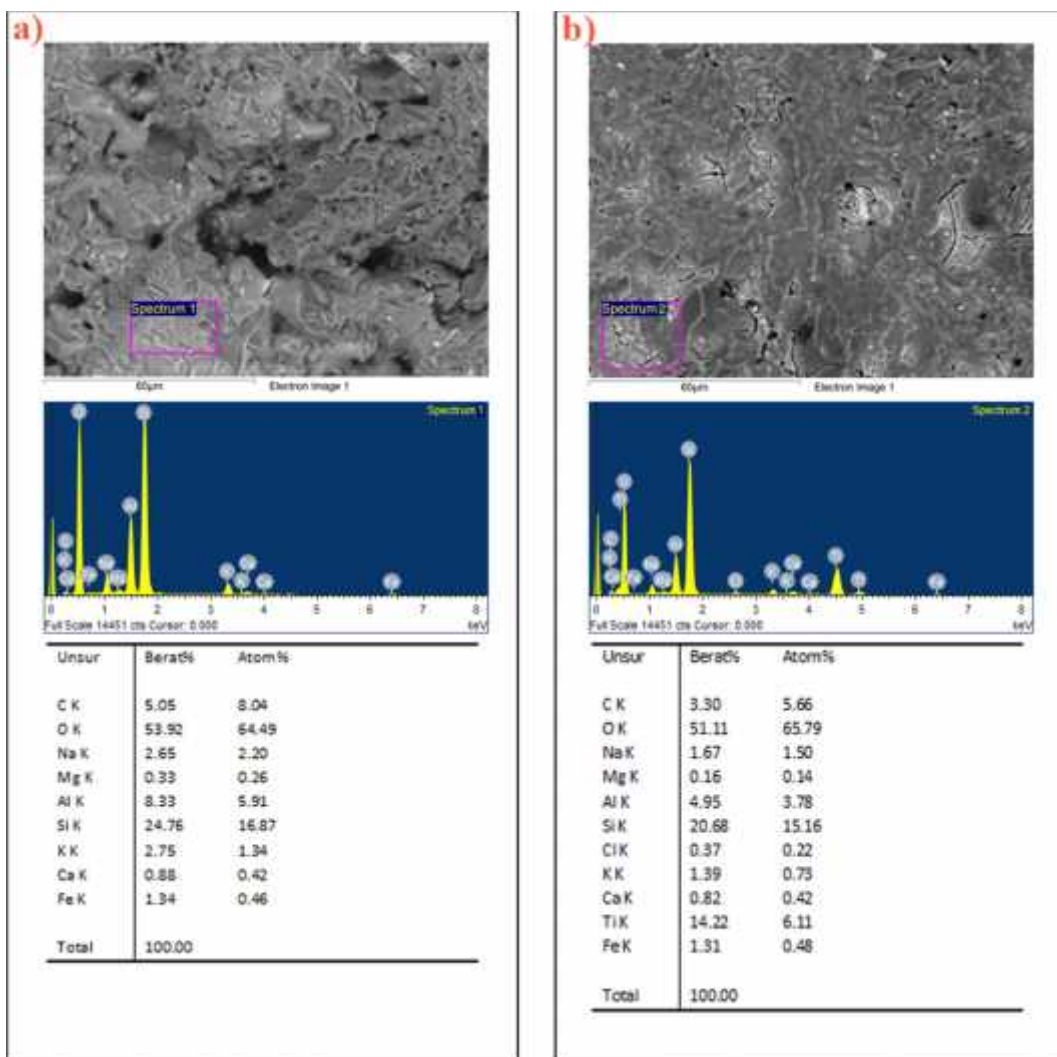
dimodifikasi memiliki ukuran pori permukaan 20-40 μm . Hal ini membuktikan bahwa modifikasi titania terhadap membran keramik yang digunakan pada sel fotovoltaik, dapat memperkecil ukuran pori dari membran tersebut.



Gambar 15. Hasil SEM morfologi permukaan membran keramik: a) Sel 0 (Perbesaran 1.000x), b) Sel 0 (Perbesaran 10.000x), c) Sel 5 (Perbesaran 1.000x), d) Sel 5 (Perbesaran 10.000x)

Komposisi unsur – unsur yang menyusun membran keramik yang digunakan pada sel 0 (tanpa modifikasi) dan sel 5 (dengan modifikasi), dianalisis dengan menggunakan metode *Electron Dispersion X-Ray Spectroscopy* (EDX), seperti yang dapat diamati pada Gambar 29. Dari Gambar 16, dapat diketahui bahwa unsur – unsur utama yang menyusun membran keramik yang digunakan pada sel 0 adalah: O (53,92 %), Si (24,76 %), Al (8,33 %) dan C (5,05 %). Sementara itu, unsur – unsur utama yang menyusun keramik yang digunakan sebagai membran pada sel 5

adalah: O (51,11 %), Si (20,68 %), Ti (14,22 %), Al (4,95 %) dan C (3,30 %). Jika dibandingkan ke dua komposisi penyusun membran di atas (sel 0 dan sel 5), dapat diketahui bahwa terdapat penambahan unsur Ti (titanium) pada membran sel yang telah dimodifikasi dengan titania sebanyak lima kali pelapisan (sel 5). Hal ini membuktikan bahwa proses *dip-coating* pada membran keramik yang telah dilakukan pada penelitian ini berhasil memodifikasi permukaan dan sekaligus memodifikasi ukuran pori dari membran keramik dengan TiO₂.



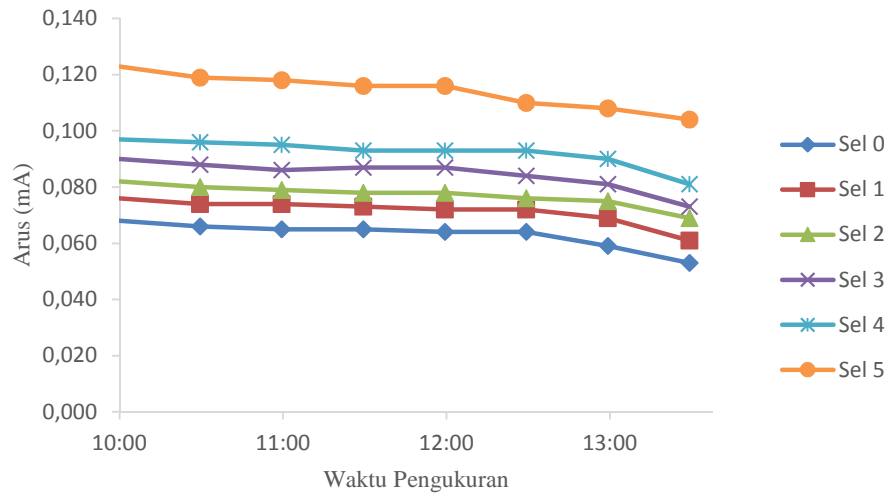
Gambar 16. Hasil analisis EDX permukaan membran keramik: a) Sel 0 b) Sel 5

4.3 Pengaruh Modifikasi Membran dengan Titania Terhadap Performa Sel Fotovoltaik dengan Aliran Elektron Diskontinu

Untuk menguji performa sel fotovoltaik yang telah dirancang dalam menghasilkan arus dan tegangan pada aliran diskontinu, dilakukan penentuan pengaruh waktu pengukuran terhadap arus dan tegangan selama dua hari pengukuran dengan rentang waktu yang telah ditentukan. Pengaruh waktu pengukuran terhadap performa enam sel yang diuji dalam menghasilkan arus dengan aliran diskontinu terlihat pada Gambar 17. Pada Gambar 17, dapat dianalisis bahwa lama pengukuran (atau dalam kasus ini adalah waktu pengukuran) berpengaruh terhadap performa seluruh sel yang diuji dalam menghasilkan arus. Arus yang dihasilkan oleh setiap sel menurun dengan bertambahnya waktu pengukuran. Hal ini terlihat pada Gambar 17, di mana grafik arus dari masing – masing sel yang diuji menurun. Penurunan performa seluruh sel dalam menghasilkan arus ini disebabkan oleh reaksi pembentukan I_2 di anoda, di mana I_2 yang berwujud gas pada anoda akan menghambat fungsi elektroda karbon dalam menghantarkan arus. Hal ini dibuktikan dengan terbentuknya gelembung pada permukaan elektroda di anoda selama proses pengukuran berlangsung. Jumlah gelembung ini bertambah dengan semakin lamanya waktu pengukuran yang mengakibatkan penurunan performa sel dalam menghasilkan arus.

Dari Gambar 17 juga dapat diamati bahwa sel 5 memiliki performa paling tinggi dalam menghasilkan arus apabila dibandingkan dengan sel – sel lainnya. Hal ini disebabkan sel 5 memiliki membran dengan ukuran pori yang lebih kecil apabila dibandingkan dengan membran sel lainnya. Ukuran pori membran yang kecil ini

diperoleh dari proses pelapisan/*coating* dengan menggunakan titania, di mana sel 5 memiliki membran yang telah dilapisi dengan titania sebanyak lima kali pelapisan.

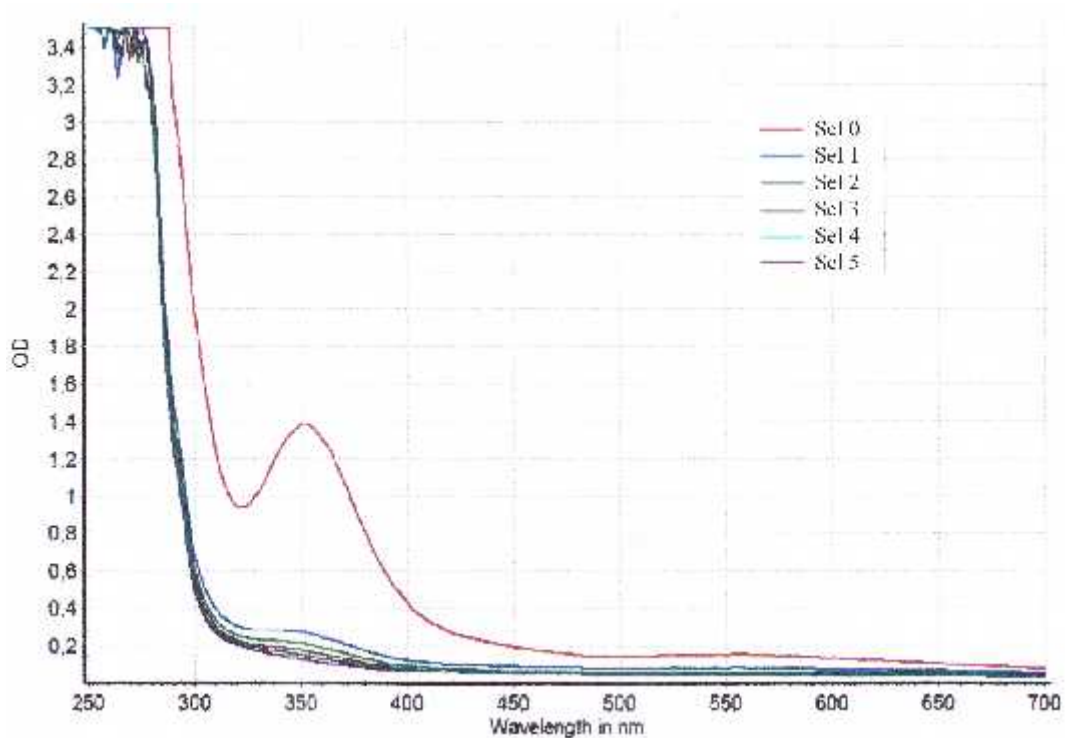


Gambar 17. Kurva pengaruh waktu pengukuran dan jumlah pelapisan membran dengan titania terhadap arus yang dihasilkan sel fotovoltaik dengan aliran diskontinu pada hari pertama

Data pengukuran arus yang dihasilkan ke enam sel fotovoltaik dengan aliran diskontinu terlihat pada lampiran Tabel 1. Pada Tabel 1, terlihat bahwa sel 5 memiliki performa yang paling tinggi dalam menghasilkan arus dibandingkan dengan sel – sel lainnya pada hari pertama pengukuran dengan aliran elektron diskontinu. Arus maksimum yang dihasilkan untuk sel 0 sampai sel 5 pada hari pertama pengukuran dengan aliran elektron diskontinu yaitu : 0,068; 0,076; 0,082; 0,090; 0,097 dan 0,123 mA, secara berturut – turut.

Untuk memastikan pengaruh modifikasi membran terhadap performa sel dalam menghasilkan arus, analisis spektrofotometri UV-Vis dilakukan terhadap larutan elektrolit di anoda sebelum dan sesudah pengukuran. Spektrum serapan larutan KI (anoda) sebelum disinari (awal) terlihat pada lampiran Gambar 31.

Spektrum serapan larutan KI (anoda) sebelum disinari (awal) terlihat pada lampiran. Spektrum larutan KI (anoda) masing – masing sel setelah pengukuran dilakukan dapat diamati pada Gambar 18. Dengan membandingkan spektrum serapan sebelum dan sesudah pengukuran, dapat diketahui bahwa terjadi kenaikan puncak serapan pada 350 nm yang diidentifikasi sebagai puncak serapan maksimum I_2 . Dari ke enam spektrum serapan yang masing – masing mewakili sel yang diuji, dapat diamati bahwa larutan elektrolit di anoda pada sel 5 memiliki puncak serapan yang paling rendah diikuti oleh sel 4, sel 3, sel 2, sel 1 dan sel 0, berturut – turut.



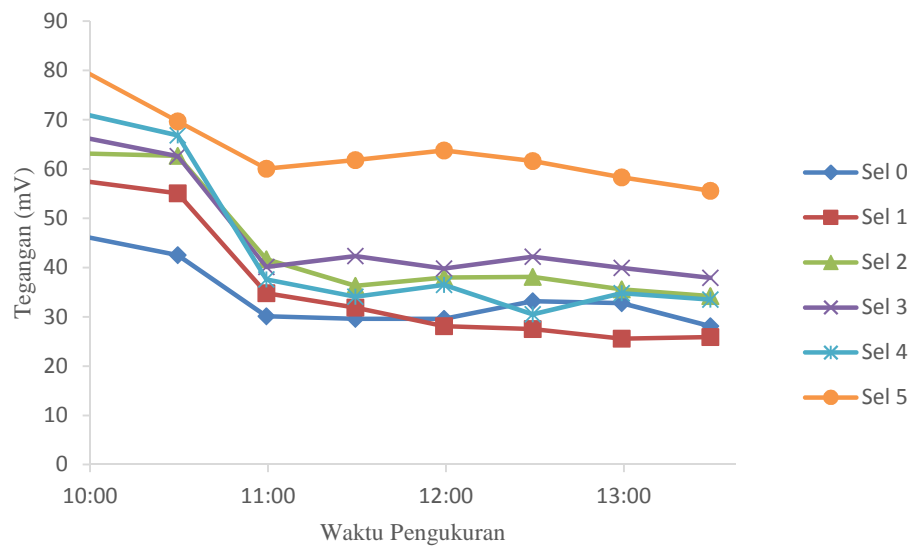
Gambar 18. Spektrum serapan UV-Vis I_2 dalam larutan KI sel fotovoltaik (anoda) setelah pengukuran dengan aliran elektron diskontinu pada hari pertama

Sel 0 memiliki puncak serapan I_2 tertinggi. Hal ini membuktikan bahwa membran yang digunakan pada sel 0 memiliki pori yang lebih besar dibandingkan sel lainnya sehingga I_2 yang dilewatkan dari katoda menuju anoda juga lebih

banyak. Akibatnya, jumlah I_2 di anoda juga semakin banyak selama proses berlangsung. Sel 5 memiliki puncak serapan I_2 paling rendah di mana hal ini juga disebabkan oleh ukuran pori membran yang digunakan. Membran yang digunakan pada sel 5 memiliki ukuran pori yang paling kecil dibandingkan sel lainnya yang menyebabkan difusi I_2 dari katoda terjadi lebih lambat dibandingkan sel yang lain. Akibatnya, I_2 yang terbentuk di anoda juga lebih sedikit.

Tegangan yang dihasilkan oleh sel – sel yang diuji dengan aliran elektron diskontinu pada hari pertama dapat diamati pada Gambar 19. Pada Gambar 19, terlihat bahwa terjadi penurunan performa seluruh sel dalam menghasilkan tegangan seiring dengan bertambahnya waktu pengukuran. Dari grafik pada Gambar 19, dapat disimpulkan bahwa modifikasi membran sel dengan titania berpengaruh terhadap performa sel dalam menghasilkan tegangan pada hari pertama pengukuran. Akan tetapi, sel 5 tetap memiliki performa yang paling baik dalam menghasilkan tegangan apabila dibandingkan dengan sel lainnya. Data pengukuran tegangan sel fotovoltaik dengan aliran diskontinu pada hari pertama dapat diamati di halaman lampiran pada Tabel 2.

Pengamatan terhadap performa sel fotovoltaik dalam menghasilkan arus dan tegangan dilanjutkan pada hari ke dua. Waktu pengukuran yang digunakan sama dengan hari pertama. Untuk mengetahui pengaruh penambahan waktu pengukuran dan modifikasi membran terhadap performa sel yang diuji dalam menghasilkan arus, dapat diamati pada Gambar. 20. Pada Gambar. 20, dapat disimpulkan juga terjadi penurunan performa seluruh sel dalam menghasilkan arus dengan semakin bertambahnya waktu.

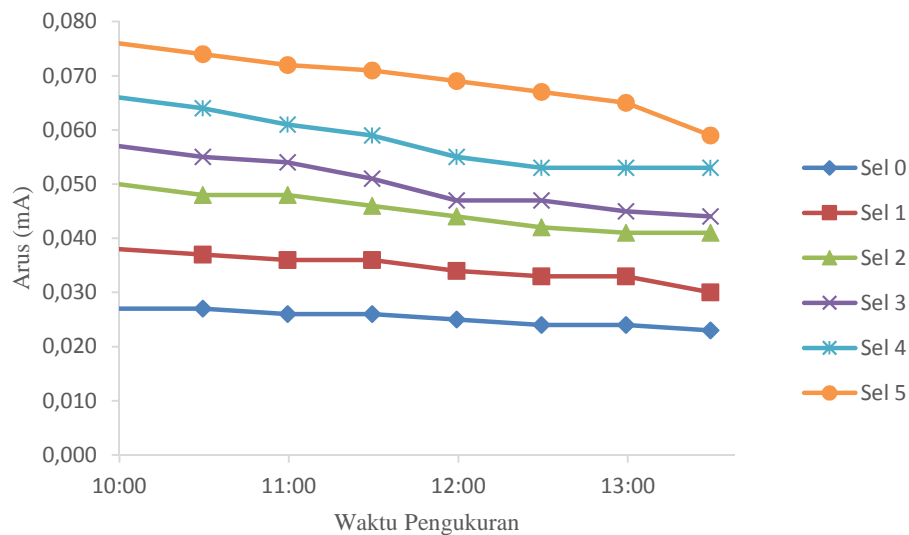


Gambar 19. Kurva pengaruh waktu pengukuran dan jumlah pelapisan membran dengan titania terhadap tegangan yang dihasilkan sel fotovoltaik dengan aliran elektron diskontinu pada hari pertama

Apabila dibandingkan dengan performa sel pada hari pertama, performa pada hari ke dua terus mengalami penurunan. Hal ini juga disebabkan oleh faktor kejenuhan elektroda karbon (anoda) yang ditutupi oleh gas I_2 . Selain itu, penurunan performa ini juga dapat diakibatkan oleh pengurangan larutan elektrolit yang terdapat di dalam sel. Pengurangan jumlah elektrolit ini sangat mempengaruhi performa sel dalam menghasilkan arus karena volume elektrolit yang digunakan pada sel cukup kecil, yaitu 1,5 mL. Pengurangan volume elektrolit yang disebabkan oleh kebocoran atau rembesan melalui membran ini, menyebabkan jumlah elektron yang dapat mengalir dari anoda menuju katoda juga akan semakin berkurang yang berakibat pada semakin kecil arus yang dihasilkan oleh sel.

Pada Gambar 20, dapat diamati bahwa sel yang memiliki performa paling baik dalam menghasilkan arus pada hari ke dua dengan aliran diskontinu adalah sel 5. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, modifikasi membran sel dengan

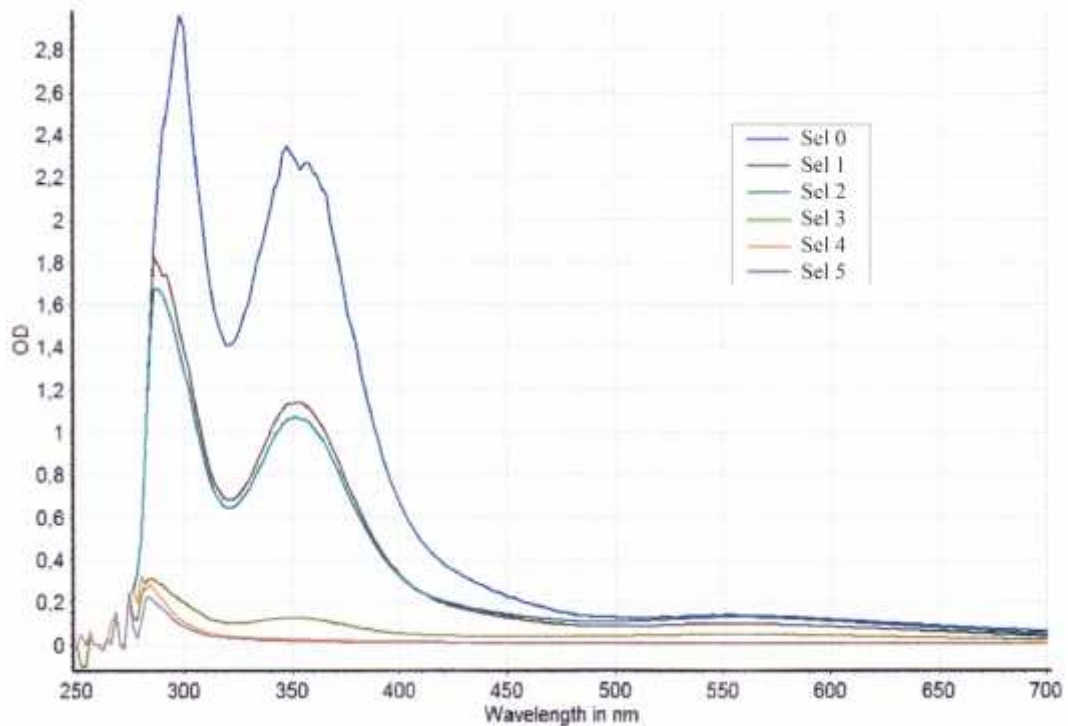
menggunakan titania sangat berpengaruh terhadap sel fotovoltaik dalam menghasilkan arus. Ukuran pori membran yang semakin kecil akan memperlambat aliran difusi I_2 dari katoda menuju anoda. Data pengukuran arus dari seluruh sel fotovoltaik dengan aliran diskontinu pada hari ke dua dapat diamati pada tabel 3. Arus maksimum yang dihasilkan untuk sel 0 sampai sel 5 pada hari ke dua dengan aliran elektron diskontinu yaitu : 0,027; 0,038; 0,050; 0,057; 0,066 dan 0,076 mA, secara berturut – turut.



Gambar 20. Kurva pengaruh waktu pengukuran dan jumlah pelapisan membran dengan titania terhadap arus yang dihasilkan sel fotovoltaik dengan aliran elektron diskontinu pada hari kedua

Untuk mengkonfirmasi pembentukan I_2 di anoda setelah proses pengukuran pada hari ke dua berlangsung, dilakukan analisis spektrofotometri UV-Vis terhadap larutan elektrolit di anoda dari seluruh sel yang diuji. Spektrum serapan dari I_2 dari larutan elektrolit ke enam sel dapat diamati pada Gambar 21. Seperti halnya hari pertama, pada hari ke dua, spektrum serapan I_2 sel 0 tetap memiliki absorban paling tinggi dibandingkan sel lainnya, diikuti sel 1, sel 2, sel 3, sel 4 dan sel 5, secara

berturut – turut. Spektrum serapan ini memastikan bahwa modifikasi terhadap ukuran pori membran sel dengan menggunakan titania sangat berpengaruh dalam menghambat laju difusi I_2 dari katoda menuju anoda.



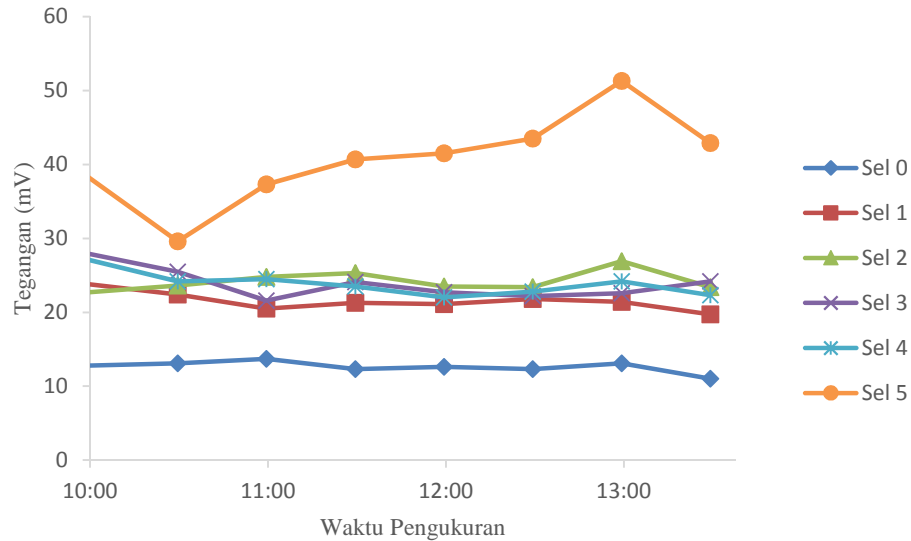
Gambar 21. Spektrum serapan UV-Vis I_2 dalam larutan KI sel fotovoltaik (anoda)

setelah pengukuran dengan aliran elektron diskontinu pada hari kedua

Pengaruh pertambahan waktu pengukuran terhadap performa sel fotovoltaik dalam menghasilkan tegangan dengan aliran diskontinu pada hari ke dua dapat diamati pada Gambar 22. Pada grafik, dapat dianalisis bahwa sel 5 tetap menjadi sel dengan performa yang paling baik dalam menghasilkan tegangan seperti halnya hari pertama. Sedangkan sel 0 tetap menjadi sel dengan performa paling buruk dalam menghasilkan tegangan.

Apabila dibandingkan dengan hari pertama pengukuran, performa seluruh sel dalam menghasilkan tegangan mengalami penurunan. Hal ini dapat disebabkan oleh peristiwa pengurangan jumlah elektrolit di mana volume elektrolit sel pada hari kedua jauh menurun (± 1 mL) jika dibandingkan volume elektrolit awal, yaitu 1,5 mL. Pengurangan volume elektrolit ini sangat berdampak pada performa sel dalam menghasilkan tegangan pada hari ke dua karena semakin sedikitnya elektron yang dapat bergerak dari anoda menuju katoda.

Kestabilan performa sel dalam menghasilkan tegangan pada aliran elektron diskontinu pada hari ke dua dapat dikatakan kurang baik seperti yang terjadi pada hari pertama pengukuran. Ketidakstabilan ini dapat disebabkan oleh intensitas cahaya datang. Data pengukuran tegangan dari ke enam sel fotovoltaik yang diuji dapat diamati pada lampiran Tabel 4.



Gambar 22. Kurva pengaruh waktu pengukuran dan jumlah pelapisan membran dengan titania terhadap tegangan yang dihasilkan sel fotovoltaik dengan aliran elektron diskontinu pada hari kedua

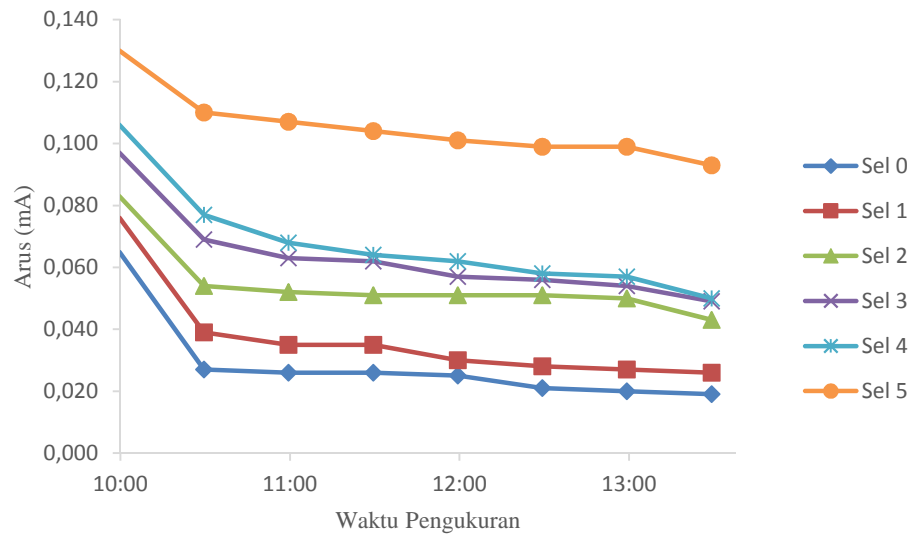
4.4 Pengaruh Modifikasi Membran dengan Titania Terhadap Performa Sel Fotovoltaik dengan Aliran Elektron Kontinu

Pengaruh waktu pengukuran dan modifikasi membran dengan titania terhadap performa sel fotovoltaik dalam menghasilkan arus dan tegangan juga diuji dengan menggunakan aliran elektron kontinu selama dua hari. Aliran kontinu diuji untuk membandingkan performa sel fotovoltaik dengan aliran elektron diskontinu. Aliran kontinu ini adalah suatu keadaan di mana elektron terus mengalir secara kontinu dari anoda menuju katoda selama waktu pengukuran berlangsung, yaitu dari pukul 10.00 – 13.30. Pengujian ini juga dilakukan dengan menggunakan sel – sel fotovoltaik yang sama dengan pengujian sebelumnya.

Pengaruh waktu pengukuran terhadap performa ke enam sel fotovoltaik dalam menghasilkan arus dengan aliran kontinu pada hari pertama dapat diamati pada Gambar 23. Dari grafik, dapat dilihat bahwa terjadi penurunan cukup besar pada waktu pengukuran ke dua (pukul 10.30) untuk seluruh sel yang diuji. Hal ini disebabkan oleh penggunaan aliran elektron kontinu di mana pada kondisi aliran ini, elektron terus mengalir secara kontinu dari anoda menuju katoda dari awal pengukuran (pukul 10.00) sampai waktu pengukuran ke dua (pukul 10.30).

Dari Gambar 23 juga dapat disimpulkan bahwa sel 5 merupakan sel yang memiliki performa paling baik dalam menghasilkan arus dengan aliran kontinu pada hari pertama pengukuran. Hal ini membuktikan bahwa modifikasi pada membran sel dengan menggunakan tiitania sangat berpengaruh terhadap performa sel dalam menghasilkan arus. Dalam kasus pengaruh modifikasi membran ini, hasil yang diperoleh dari aliran kontinu juga sesuai dengan hasil yang diperoleh dari aliran diskontinu. Data pengukuran arus dari ke enam sel fotovoltaik yang diuji

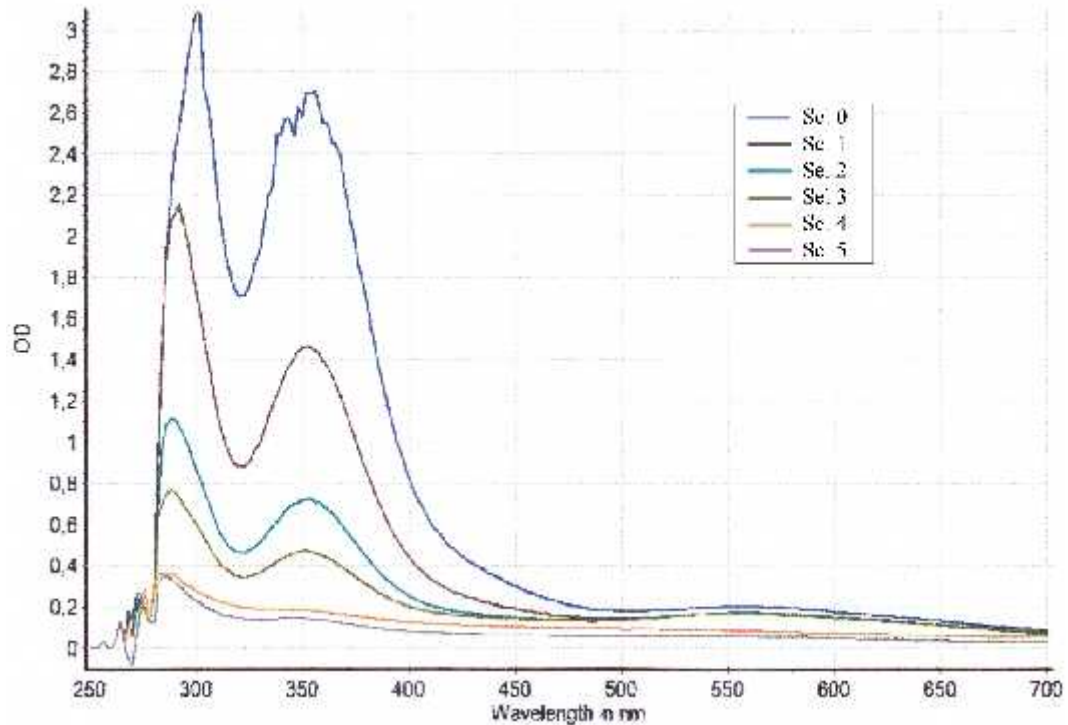
dengan aliran kontinu pada hari pertama dapat diamati di halaman lampiran pada Tabel 5. Arus maksimum yang dihasilkan untuk sel 0 sampai sel 5 pada hari pertama dengan aliran elektron kontinu yaitu : 0,065; 0,076; 0,083; 0,097; 0,106 dan 0,130 mA, secara berturut – turut.



Gambar 23. Kurva pengaruh waktu pengukuran dan jumlah pelapisan membran dengan titania terhadap arus yang dihasilkan sel fotovoltaik dengan aliran elektron kontinu pada hari pertama

Pengaruh modifikasi membran dengan titania dalam memperlambat difusi I_2 dari katoda menuju anoda dikonfirmasi dengan menggunakan analisis spektrofotometri UV-Vis, seperti terlihat pada Gambar 24. Dari ke enam spektrum puncak serapan I_2 dalam elektrolit di anoda, pada 350 nm, dapat dikatakan bahwa sel 0 memiliki absorban serapan maksimum paling tinggi diikuti dengan sel 1, sel 2, sel 3, sel 4 dan sel 5, secara berturut – turut. Sel 5 merupakan sel yang memiliki serapan maksimum terendah. Hal ini membuktikan bahwa membran sel 5 dapat memperlambat difusi I_2 lebih lama dibanding membran sel yang lain karena

membran sel 5 memiliki ukuran pori yang lebih kecil daripada ke lima membran sel yang lain.

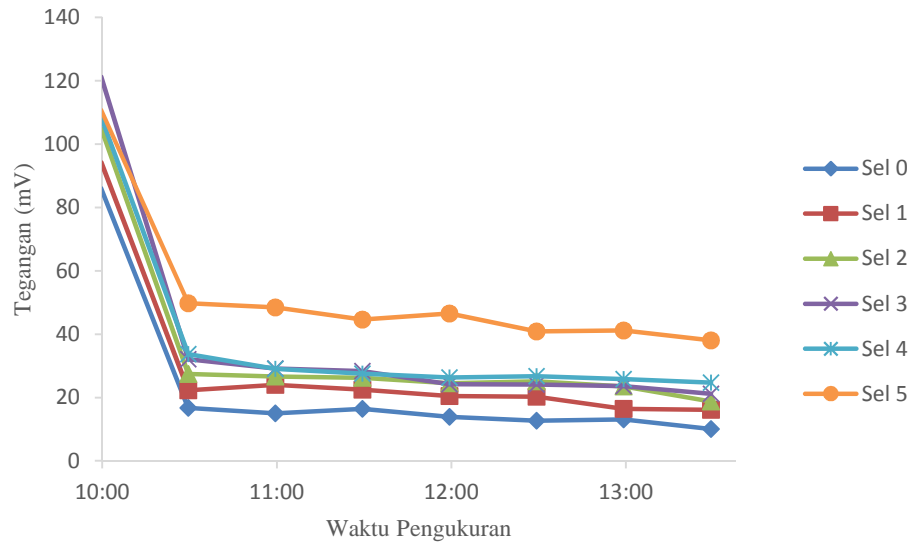


Gambar 24. Spektrum serapan UV-Vis I_2 dalam larutan KI sel fotovoltaik (anoda) setelah pengukuran dengan aliran elektron kontinu pada hari pertama

Pengaruh waktu pengukuran terhadap performa sel fotovoltaik dalam menghasilkan tegangan dengan aliran elektron kontinu pada hari pertama terlihat pada Gambar 25. Pada grafik, dapat dikatakan bahwa terjadi penurunan tegangan seiring dengan bertambahnya waktu pengukuran. Pengurangan yang cukup tajam terjadi pada waktu pengukuran ke dua, yaitu pada pukul 10.30. Hal ini merupakan akibat dari aliran elektron kontinu pada seluruh sel yang diuji.

Aliran kontinu yang digunakan mulai dari waktu pengukuran pertama sampai pengukuran ke dua menyebabkan pembentukan I_2 di anoda berlangsung dengan cepat yang mengakibatkan elektroda karbon yang digunakan juga cepat mengalami

kejenuhan akibat tertutup oleh gas I_2 . Hal ini yang menyebabkan performa sel dalam menghasilkan tegangan turun secara drastis pada waktu pengukuran ke dua.

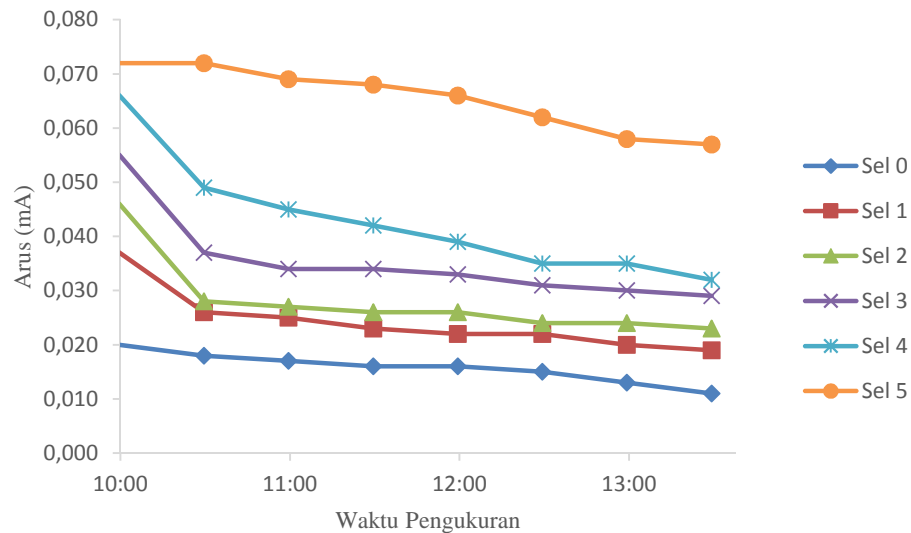


Gambar 25. Kurva pengaruh waktu pengukuran dan jumlah pelapisan membran dengan titania terhadap tegangan yang dihasilkan sel fotovoltaik dengan aliran elektron kontinu pada hari pertama

Berdasarkan Gambar 25, sel 5 merupakan sel yang memiliki performa paling baik dalam menghasilkan tegangan dengan aliran elektron kontinu pada hari pertama. Data pengukuran tegangan sel fotovoltaik dengan aliran elektron kontinu pada hari pertama terlihat di Tabel 6 pada lampiran.

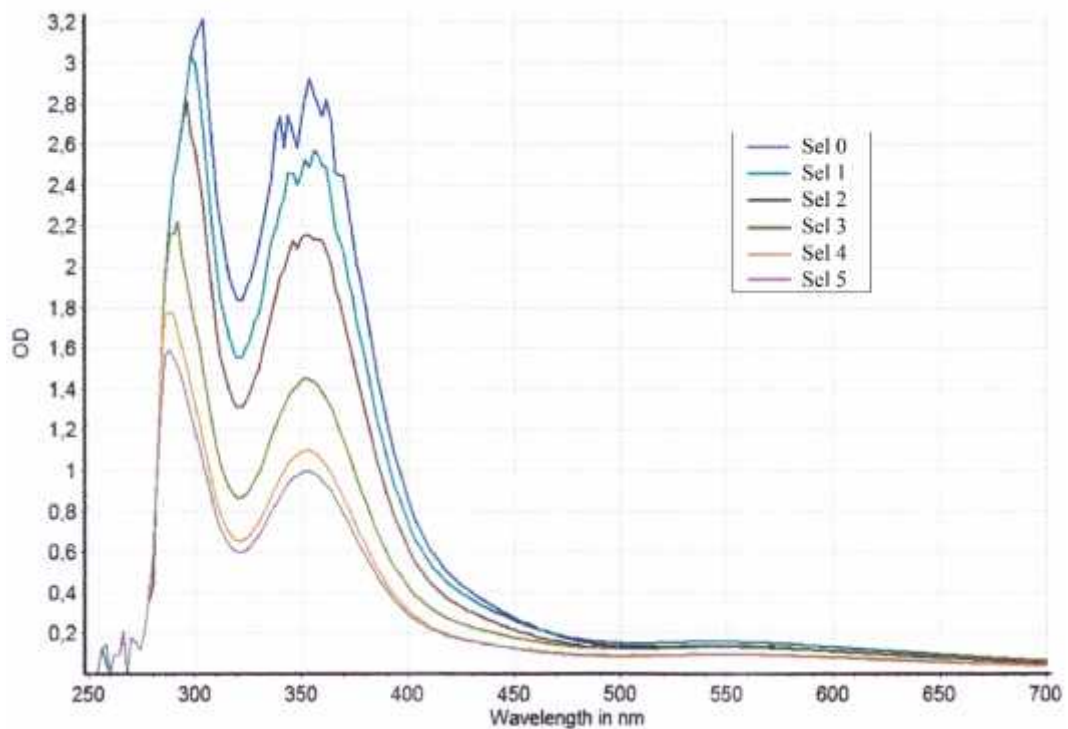
Pengaruh waktu pengukuran terhadap performa ke enam sel fotovoltaik yang diuji dalam menghasilkan arus dengan aliran elektron kontinu pada hari ke dua pengukuran dapat dilihat pada Gambar 26. Dari grafik, terlihat bahwa performa sel dalam menghasilkan arus menurun sejalan dengan bertambahnya waktu pengukuran. Penurunan performa ini disebabkan oleh semakin jenuhnya elektroda karbon di anoda akibat tertutup oleh I_2 . Semakin jenuhnya elektroda menyebabkan terhambatnya aliran elektron dari anoda menuju katoda sehingga arus yang

dihasilkan akan semakin kecil. Jika dibandingkan dengan pengukuran arus pada hari pertama, arus yang diperoleh oleh seluruh sel pada hari ke dua mengalami penurunan.



Gambar 26. Kurva pengaruh waktu pengukuran dan jumlah pelapisan membran dengan titania terhadap arus yang dihasilkan sel fotovoltaik dengan aliran elektron kontinu pada hari kedua

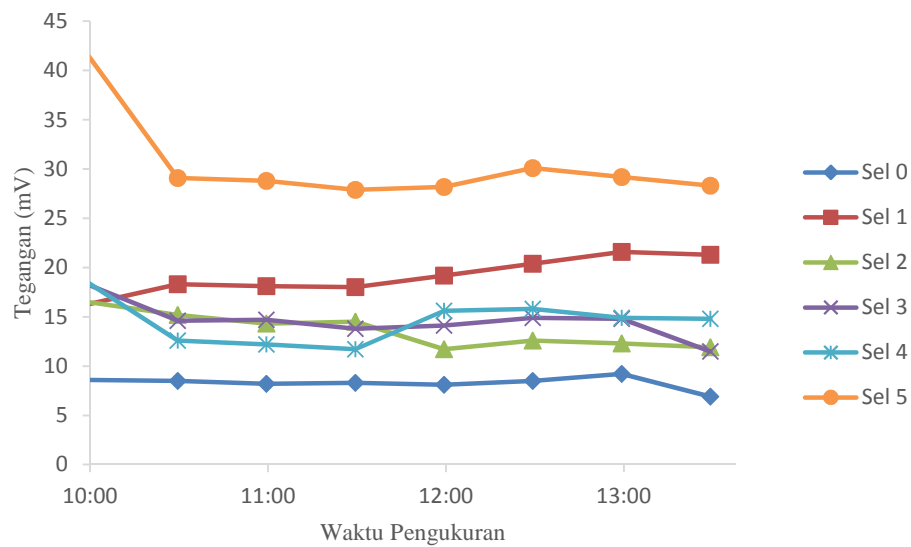
Pengaruh modifikasi membran dengan menggunakan titania terhadap performa sel dalam menghasilkan arus dengan aliran elektron kontinu pada hari ke dua juga dapat diamati pada Gambar 26. Dari grafik ke enam sel, dapat diamati bahwa sel 5 memiliki performa paling baik jika dibandingkan dengan sel – sel yang lain. Data pengukuran arus yang dihasilkan oleh ke enam sel fotovoltaik yang diuji dengan aliran elektron kontinu pada hari ke dua dapat diamati di Tabel 7 pada lampiran. Arus maksimum yang dihasilkan untuk sel 0 sampai sel 5 pada hari ke dua dengan aliran elektron kontinu yaitu : 0,020; 0,037; 0,046; 0,055; 0,066 dan 0,072 mA, secara berturut – turut.



Gambar 27. Spektrum serapan UV-Vis I₂ dalam larutan KI sel fotovoltaik (anoda) setelah pengukuran dengan aliran elektron kontinu pada hari kedua

Untuk mengkonfirmasi pembentukan I₂ di anoda selama proses pengukuran berlangsung, dilakukan dengan menggunakan spektrofotometer UV-Vis seperti yang dapat dilihat pada Gambar 27. Dari spektrum serapan pada Gambar 27, terlihat bahwa spektrum puncak serapan I₂ pada 350 nm di anoda untuk sel 5 memiliki absorban paling rendah apabila dibandingkan dengan puncak serapan I₂ sel lainnya. Hal ini membuktikan bahwa membran sel 5 dapat menghambat difusi I₂ dari katoda menuju anoda lebih baik dibandingkan membran sel lainnya.

Pengaruh waktu pengukuran terhadap performa sel fotovoltaik dalam menghasilkan tegangan dengan aliran kontinu pada hari ke dua terlihat pada Gambar 28. Terlihat bahwa sel 5 masih menjadi sel dengan performa yang paling baik dalam menghasilkan tegangan seperti halnya hari pertama, diikuti dengan sel 4, sel 3, sel 2, sel 1 dan sel 0, secara berturut – turut.



Gambar 28. Kurva pengaruh waktu pengukuran dan jumlah pelapisan membran dengan titania terhadap tegangan yang dihasilkan sel fotovoltaik dengan aliran elektron kontinu pada hari kedua

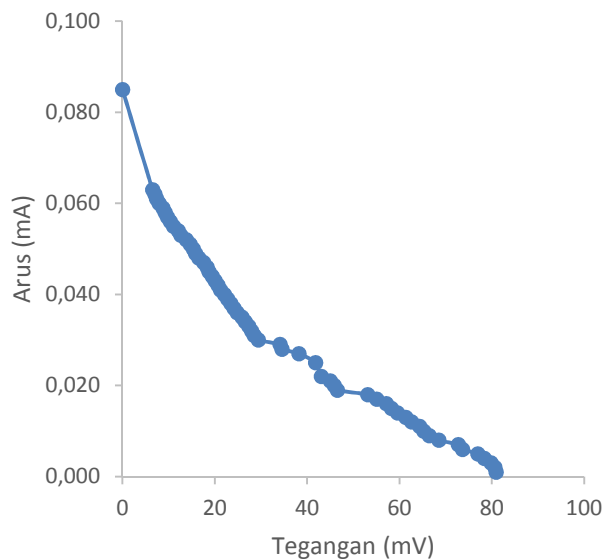
Performa seluruh sel dalam menghasilkan tegangan mengalami penurunan pada hari ke dua apabila dibandingkan dengan hari pertama. Hal ini juga dapat disebabkan oleh pengurangan elektrolit baik di anoda maupun di katoda. Pengurangan volume elektrolit ini mengakibatkan performa seluruh sel dalam menghasilkan tegangan pada hari ke dua menurun, karena jumlah elektron yang jauh lebih sedikit yang dapat dihasilkan pada hari ke dua. Data pengukuran tegangan dari ke enam sel fotovoltaik yang diuji dengan aliran elektron kontinu pada hari kedua, dapat dilihat pada lampiran Tabel 8.

4.5 Karakterisasi Hubungan Arus Terhadap Tegangan Sel Fotovoltaik (Kurva I-V)

Sel 5 atau sel dengan membran yang telah dimodifikasi dengan titania dengan metode *dip-coating* sebanyak lima kali pelapisan, telah dibuktikan sebagai sel dengan performa yang paling baik dalam menghasilkan arus dan tegangan baik

dengan aliran elektron diskontinu maupun kontinu selama dua hari pengukuran. Karakterisasi hubungan arus terhadap tegangan (kurva I-V) dilakukan terhadap sel 5 untuk mempelajari dan menganalisis performa sel tersebut, seperti yang dapat diamati pada Gambar 29. Pada Gambar 29, terlihat bahwa kurva hasil hubungan antara arus dan tegangan berbentuk linear. Hubungan antara arus dan tegangan berbanding terbalik. Hubungan ini diperoleh dengan cara mengatur tahanan saat proses pengukuran berlangsung. Semakin besar tahanan maka arus akan semakin rendah. Hal ini sesuai dengan kurva I-V yang terdapat di dalam literatur, namun terdapat perbedaan bentuk kurva yang diperoleh dari sel dalam penelitian ini jika dibandingkan dengan kurva I-V yang ideal secara teoritis. Kurva I-V yang ideal memiliki bentuk melengkung. Lengkungan ini diperoleh pada saat pengukuran arus hanya mengalami sedikit penurunan atau relatif konstan sementara tegangan mengalami kenaikan yang cukup tinggi pada saat tahanan diperbesar.

Perbedaan kurva I-V yang diperoleh ini disebabkan oleh arus dan tegangan yang dihasilkan sel cukup rendah dan penggunaan tahanan yang besar (10 k Ω) sehingga pengukuran yang dilakukan kurang sensitif. Berdasarkan kurva I-V yang diperoleh, dapat ditentukan parameter – parameter dari sel 5 yang diuji dalam penelitian ini, yaitu arus hubungan pendek (I_{sc}), tegangan rangkaian terbuka (V_{oc}), arus maksimum (I_{maks}), tegangan maksimum (V_{maks}), daya maksimum (P_{maks}), faktor pengisian (FF) dan efisiensi konversi energi (η). Nilai – nilai parameter tersebut adalah sebagai berikut: I_{sc} (0,085 mA), V_{oc} (80,9 mV), I_{maks} (0,025 mA), V_{maks} (41,8 mV), P_{maks} ($1,045 \times 10^{-6}$ Watt), FF (0,152) dan η (0,553 %).



Gambar 29. Hubungan arus dan tegangan (I-V) dalam karakterisasi kinerja sel fotovoltaik 5

Nilai daya maksimum yang dihasilkan oleh sel 5 cukup kecil, yaitu $1,045 \times 10^{-6}$ Watt. Akan tetapi, nilai daya ini dihasilkan dari sel dengan elektroda karbon dengan luas $6,750 \times 10^{-5} \text{ m}^2$. Luas elektroda yang digunakan dalam sel ini cukup kecil sehingga daya yang dihasilkan juga relatif kecil. Untuk mengetahui efisiensi daya yang dihasilkan per satuan luas elektroda, dilakukan perhitungan seperti yang dapat diamati pada halaman lampiran. Nilai P_{maks} per satuan luas elektroda yang diperoleh dari sel 5 adalah $0,016 \text{ Watt/m}^2$. Nilai efisiensi konversi energi (η) dan *fill factor* (FF) yang diperoleh dari sel 5 dengan menggunakan kurva I-V masing – masing adalah 0,553 % dan 0,152. Ke dua nilai ini tergolong kecil untuk suatu sel fotovoltaik ketika digunakan sebagai acuan untuk mengkarakterisasi performa sel tersebut. Kecilnya atau ketidaktepatan pengukuran nilai η dan FF ini disebabkan oleh sel 5 yang digunakan hanya berjumlah 1 unit. Untuk mendapatkan pengukuran yang lebih tepat baik terhadap arus dan tegangan, diperlukan beberapa unit sel 5 yang disusun dalam rangkaian seri maupun paralel.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa performa sel fotovoltaik dengan sistem larutan elektrolit KI/KI₃ dipengaruhi oleh keadaan membran. Performa terbaik diperoleh pada sel fotovoltaik dengan membran keramik yang dilapisi titania (TiO₂) sebanyak 5 kali. Berbagai parameter dari kinerja sel fotovoltaik, yaitu: I_{sc} (0,085 mA), V_{oc} (80,9 mV), I_{maks} (0,025 mA), V_{maks} (41,8 mV), P_{maks} (1,045 x 10⁻⁶ Watt), FF (0,152) dan efisiensi, (0,553 %).

5.2 Saran

Untuk memperoleh arus dan tegangan yang lebih optimum, disarankan untuk memodifikasi membran dengan menggunakan material pendukung lainnya. Selain itu, juga disarankan untuk menggunakan elektroda karbon atau elektroda lain dengan kondisi permukaan yang lebih luas.

DAFTAR PUSTAKA

- Alturaif, H. A., A. Lothman ZA, Shapter, J. G. & Wabaidur, S. M. 2014. Use of carbon nanotubes (CNTs) with polymers in solar cells. *Molecules*, 19, 17329-17344.
- Amoli, V., Tiwari, R., Dutta, A., Bhaumik, A. & Sinha, A. K. 2014. Structurally stabilized organosilane-templated thermostable mesoporous titania. *Chemphyschem*, 15, 187-94.
- Arief, S., Alif, A. & Willian, N. 2008. Pembuatan Lapisan Tipis TiO₂-Doped Logam M (M= Ni, Cu dan Zn) dengan Metoda Dip-Coating dan Aplikasi Sifat Katalitiknya Pada Penjernihan Air Rawa Gambut. *J Ris Kim*, 2, 69-73.
- Ariswan. 2010. Prospek penelitian dan aplikasi fotovoltaiik sebagai sumber energi alternatif di Indonesia. Yogyakarta: Jurusan Kimia FMIPA UNY.
- Beiser, A. 1992. *Konsep Fisika Modern*, Jakarta, Erlangga.
- Culp, A. W. Jr. 1984. *Prinsip-prinsip Konversi Energi*, Jakarta, Erlangga.
- Dewi, A. Y & Antonov. 2013. Pemanfaatan energi surya sebagai suplai cadangan pada laboratorium elektro dasar di Institut Teknologi Padang. *J Teknik Elektro*, 2, 20-28.
- Diana, A., Aziz, H. & Alif, A. 2013. Kestabilan sel surya dengan fotosensitizer ekstrak zat warna kulit jengkol (*Pithecellobium lobatum* Benth.). *J Kim Unand*, 2, 32-38.
- Dou, L., You, J., Hong, Z., Xu, Z., Li, G., Street, R. A. & Yang, Y. 2013. 25th anniversary article: a decade of organic/polymeric photovoltaic research. *Adv Mater*, 25, 6642-71.
- Fujishima, A., Rao, T. N. & Tryk, D. A. 2000. Titanium dioxide photocatalysis. *Photochem Photobiol C: Photochem Rev*, 1, 1-21.
- Gunlazardi, J. Fotokatalisis Pada Permukaan TiO₂: Aspek Fundamentalik dan Aplikasinya. Seminar Nasional Kimia Fisika II, Jurusan Kimia FMIPA UI, 2001 Depok. UI Press.
- Hamdani, D., Subagianda, K. & Subagiyo, L. 2011. Analisis kinerja solar photovoltaic system (SPS) berdasarkan tinjauan efisiensi energi dan eksergi. *J Mater dan Energi Indonesia*, 1, 84-92.
- Handayani, A., Sumaryo & Sitompul A. 2007. Pengamatan Struktur Mikro dengan Mikroskop Optik dan Scanning Electron Microscope (SEM-EDAX). Serpong: Pusat Pendidikan dan Pelatihan Badan Tenaga Nuklir Nasional.
- Henning, A., Gunzburger, G., Johr, R., Rosenwaks, Y., Bozic-Weber, B., Housecroft, C. E., Constable, E. C., Meyer, E. & Glatzel, T. 2013. Kelvin probe force microscopy of nanocrystalline TiO₂ photoelectrodes. *Beilstein J Nanotechnol*, 4, 418-28.
- Hoffmann, M. R., Martin, S. T., Choi, W. & Bahnemann, D. W. 1995. Environmental applications of semiconductor photocatalysis. *Chem Rev*, 95, 69-96.

- Kim, M. S. 2009. *Understanding Organic Photovoltaic Cells: Electrode, Nanostructure, Reliability, and Performance*. Doctor, The University of Michigan.
- Lee, A. C., Lin, R. H, Yang, C. Y., Lin, M. H. & Wang, W. Y. 2008. Preparation and characterization of novel photocatalysts with mesoporous titanium dioxide (TiO₂) via a sol-gel method. *Mater Chem Phys*, 109, 275-280.
- Lee, C. H., Rhee, S. W. & Choi, H. W. 2012. Preparation of TiO₂ nanotube/nanoparticle composite particles and their applications in dye-sensitized solar cells. *Nanoscale Res Lett*, 7, 48.
- Liu, C., Li, Y., Wei, L., Wu, C., Chen, Y., Mei, L. & Jiao, J. 2014. CdS quantum dot-sensitized solar cells based on nano-branched TiO₂ arrays. *Nanoscale Res Lett*, 9, 107.
- Lorenzo, E. 1984. *Solar Electricity Engineering of Photovoltaic System*, Spain, Artes Graficas Gala.
- Maddu, A., Zuhri, M. & Irmansyah. 2007. Penggunaan ekstrak antosianin kol merah sebagai fotosensitizer pada sel surya TiO₂ nanokristal tersensitisasi dye. *Makara Tek*, 2, 78-84.
- Moller, H. J. 1993. *Semiconductor for Solar Cells*, England, Artech House Inc.
- Ooyama, Y. & Harima, Y. 2012. Photophysical and electrochemical properties, and molecular structures of organic dyes for dye-sensitized solar cells. *Chemphyschem*, 13, 4032-80.
- Pietruszka, R., Witkowski, B. S., Luka, G., Wachnicki, L., Gieraltowska, S., Kopalko, K., Zielony, E., Bieganski, P., Placzek-Popko, E. & Godlewski, M. 2014. Photovoltaic properties of ZnO nanorods/p-type Si heterojunction structures. *Beilstein J Nanotechnol*, 5, 173-9.
- Putri, D. O., Alif, A. & Imelda. 2013. Penggunaan Pasangan Elektroda CuO-C Pada Sel Fotovoltaik dengan Elektrolit Na₂SO₄ dalam Gel Agar. *J Kim Unand*, 2, 79-86.
- Thiyagu, S., Pei, Z. & Jhong, M. S. 2012. Amorphous silicon nanocone array solar cell. *Nanoscale Res Lett*, 7, 172.
- Tribidasari, I. 2008. Construction of Gold Nanoparticles Array at Carbon Substrate by Self-Assembly Method for Sensor and Biosensor Applications. Bangkok: Bangkok Meeting.
- Vanika, D., Alif, A. & Tetra, O. N. 2013. Sel Fotovoltaik Aliran Kontinu dari Sistem KI/KI₃ dengan Membran Keramik Sebagai Pemisah. *J Kim Unand*, 2, 42-48.
- Wang, J. 2000. *Analytical Electrochemistry*, USA, A John Wiley and Sons, Inc.
- Xiang, P., Li, X., Wang, H., Liu, G., Shu, T., Zhou, Z., Ku, Z., Rong, Y., Xu, M., Liu, L., Hu, M., Yang, Y., Chen, W., Liu, T., Zhang, M. & Han, H. 2011. Mesoporous nitrogen-doped TiO₂ sphere applied for quasi-solid-state dye-sensitized solar cell. *Nanoscale Res Lett*, 6, 606.

LAMPIRAN

Penentuan Berat KI dan I₂ yang Digunakan Sebagai Elektrolit

$$\text{Mr KI} = 166 \text{ g/mol}$$

$$\text{Konsentrasi Lar. KI} = 0,125 \text{ N}$$

$$\text{Volume Lar. KI} = 1000 \text{ mL}$$

$$\text{BE KI} = \frac{\text{Mr KI}}{e^-} = \frac{166 \text{ g/mol}}{1 e^-} = 166 \text{ g/mol}$$

$$N = \frac{m}{\text{BE}} \times \frac{1000}{V}$$

$$0,125 \text{ N} = \frac{m}{166 \text{ g/mol}} \times \frac{1000}{1000 \text{ mL}}$$

$$m \text{ KI} = 20,75 \text{ g}$$

$$\begin{aligned} \text{Konsentrasi I}_2 &= 1000 \text{ mg/L} = 1 \text{ g/L} \\ &= 0,25 \text{ g} / 0,25 \text{ L} \\ &= 0,25 \text{ g} / 250 \text{ mL} \end{aligned}$$

$$m \text{ I}_2 = 0,25 \text{ g}$$

Tabel 1. Pengaruh jumlah pelapisan membran dengan titania terhadap arus yang dihasilkan sel fotovoltaik aliran elektron diskontinu pada hari pertama

Waktu Pengukuran	Arus (mA)					
	Sel 0	Sel 1	Sel 2	Sel 3	Sel 4	Sel 5
10.00	0,068	0,076	0,082	0,090	0,097	0,123
10.30	0,066	0,074	0,080	0,088	0,096	0,119
11.00	0,065	0,074	0,079	0,086	0,095	0,118
11.30	0,065	0,073	0,078	0,087	0,093	0,116
12.00	0,064	0,072	0,078	0,087	0,093	0,116
12.30	0,064	0,072	0,076	0,084	0,093	0,110
13.00	0,059	0,069	0,075	0,081	0,090	0,108
13.30	0,053	0,061	0,069	0,073	0,081	0,104

Tabel 2. Pengaruh jumlah pelapisan membran dengan titania terhadap tegangan yang dihasilkan sel fotovoltaik aliran elektron diskontinu pada hari pertama

Waktu Pengukuran	Tegangan (mV)					
	Sel 0	Sel 1	Sel 2	Sel 3	Sel 4	Sel 5
10.00	46,1	57,4	63,1	66,2	70,9	79,4
10.30	42,5	55,1	62,7	62,6	66,8	69,7
11.00	30,1	34,8	41,7	40,1	37,6	60,1
11.30	29,6	31,9	36,3	42,3	34,1	61,8
12.00	29,6	28,1	38,0	39,8	36,5	63,8
12.30	33,2	27,5	38,1	42,2	30,5	61,6
13.00	32,8	25,6	35,6	39,9	34,8	58,3
13.30	28,1	25,9	34,2	37,9	33,5	55,6

Intensitas Matahari Rata – Rata Aliran Diskontinu Hari Pertama

$$\begin{aligned}
 \text{Pin rata-rata} &= 124,1 \text{ Fc} \times \frac{10,76 \text{ lux}}{1 \text{ Fc}} \times \frac{0,001464 \text{ Watt/m}^2}{1 \text{ lux}} \\
 &= 1,955 \text{ Watt/m}^2
 \end{aligned}$$

Tabel 3. Pengaruh jumlah pelapisan membran dengan titania terhadap arus yang dihasilkan sel fotovoltaik aliran elektron diskontinu pada hari kedua

Waktu Pengukuran	Arus (mA)					
	Sel 0	Sel 1	Sel 2	Sel 3	Sel 4	Sel 5
10.00	0,027	0,038	0,050	0,057	0,066	0,076
10.30	0,027	0,037	0,048	0,055	0,064	0,074
11.00	0,026	0,036	0,048	0,054	0,061	0,072
11.30	0,026	0,036	0,046	0,051	0,059	0,071
12.00	0,025	0,034	0,044	0,047	0,055	0,069
12.30	0,024	0,033	0,042	0,047	0,053	0,067
13.00	0,024	0,033	0,041	0,045	0,053	0,065
13.30	0,023	0,030	0,041	0,044	0,053	0,059

Tabel 4. Pengaruh jumlah pelapisan membran dengan titania terhadap tegangan yang dihasilkan sel fotovoltaik aliran elektron diskontinu pada hari kedua

Waktu Pengukuran	Tegangan (mV)					
	Sel 0	Sel 1	Sel 2	Sel 3	Sel 4	Sel 5
10.00	12,8	23,8	22,7	27,9	27,1	38,2
10.30	13,1	22,4	23,6	25,5	24,2	29,6
11.00	13,7	20,5	24,8	21,6	24,5	37,3
11.30	12,3	21,3	25,3	24,1	23,5	40,7
12.00	12,6	21,1	23,5	22,7	22,0	41,5
12.30	12,3	21,8	23,4	22,2	22,8	43,5
13.00	13,1	21,4	26,9	22,6	24,2	51,3
13.30	11,0	19,7	23,4	24,2	22,3	42,9

Intensitas Matahari Rata – Rata Aliran Diskontinu Hari Kedua

$$\begin{aligned}
 \text{Pin rata-rata} &= 176,3 \text{ Fc} \times \frac{10,76 \text{ lux}}{1 \text{ Fc}} \times \frac{0,001464 \text{ Watt/m}^2}{1 \text{ lux}} \\
 &= 2,777 \text{ Watt/m}^2
 \end{aligned}$$

Tabel 5. Pengaruh jumlah pelapisan membran dengan titania terhadap arus yang dihasilkan sel fotovoltaik aliran elektron kontinu pada hari pertama

Waktu Pengukuran	Arus (mA)					
	Sel 0	Sel 1	Sel 2	Sel 3	Sel 4	Sel 5
10.00	0,065	0,076	0,083	0,097	0,106	0,130
10.30	0,027	0,039	0,054	0,069	0,077	0,110
11.00	0,026	0,035	0,052	0,063	0,068	0,107
11.30	0,026	0,035	0,051	0,062	0,064	0,104
12.00	0,025	0,030	0,051	0,057	0,062	0,101
12.30	0,021	0,028	0,051	0,056	0,058	0,099
13.00	0,020	0,027	0,050	0,054	0,057	0,099
13.30	0,019	0,026	0,043	0,049	0,050	0,093

Tabel 6. Pengaruh jumlah pelapisan membran dengan titania terhadap tegangan yang dihasilkan sel fotovoltaik aliran elektron kontinu pada hari pertama

Waktu Pengukuran	Tegangan (mV)					
	Sel 0	Sel 1	Sel 2	Sel 3	Sel 4	Sel 5
10.00	86,1	94,3	105,0	121,2	108,5	110,7
10.30	16,7	22,3	27,4	32,1	33,7	49,8
11.00	15,0	24,0	26,6	29,2	29,1	48,5
11.30	16,4	22,5	26,2	28,3	27,5	44,6
12.00	13,9	20,5	24,5	24,2	26,3	46,5
12.30	12,7	20,3	25,1	24,1	26,7	40,9
13.00	13,1	16,4	23,5	23,6	25,8	41,2
13.30	10,1	16,1	18,7	21,2	24,7	38,1

Intensitas Matahari Rata – Rata Aliran Kontinu Hari Pertama

$$\begin{aligned}
 \text{Pin rata-rata} &= 145,4 \text{ Fc} \times \frac{10,76 \text{ lux}}{1 \text{ Fc}} \times \frac{0,001464 \text{ Watt/m}^2}{1 \text{ lux}} \\
 &= 2,290 \text{ Watt/m}^2
 \end{aligned}$$

Tabel 7. Pengaruh jumlah pelapisan membran dengan titania terhadap arus yang dihasilkan sel fotovoltaik aliran elektron kontinu pada hari kedua

Waktu Pengukuran	Arus (mA)					
	Sel 0	Sel 1	Sel 2	Sel 3	Sel 4	Sel 5
10.00	0,020	0,037	0,046	0,055	0,066	0,072
10.30	0,018	0,026	0,028	0,037	0,049	0,072
11.00	0,017	0,025	0,027	0,034	0,045	0,069
11.30	0,016	0,023	0,026	0,034	0,042	0,068
12.00	0,016	0,022	0,026	0,033	0,039	0,066
12.30	0,015	0,022	0,024	0,031	0,035	0,062
13.00	0,013	0,020	0,024	0,030	0,035	0,058
13.30	0,011	0,019	0,023	0,029	0,032	0,057

Tabel 8. Pengaruh jumlah pelapisan membran dengan titania terhadap tegangan yang dihasilkan sel fotovoltaik aliran elektron kontinu pada hari kedua

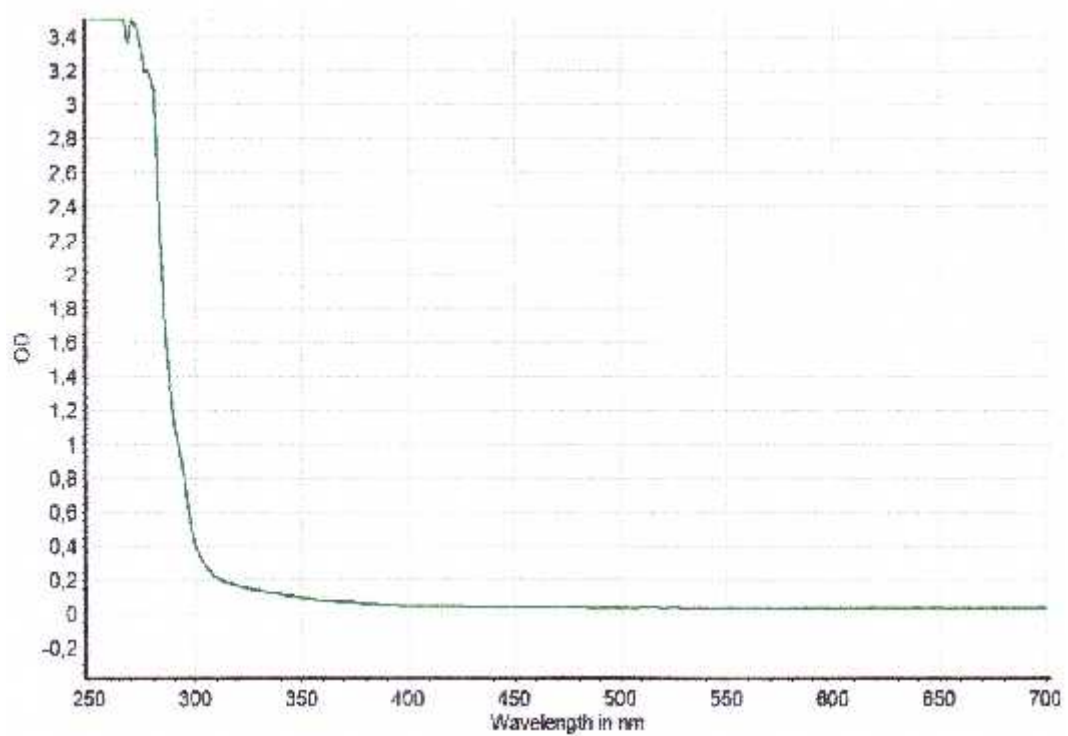
Waktu Pengukuran	Tegangan (mV)					
	Sel 0	Sel 1	Sel 2	Sel 3	Sel 4	Sel 5
10.00	8,6	16,3	16,5	18,2	18,4	41,4
10.30	8,5	18,3	15,2	14,6	12,6	29,1
11.00	8,2	18,1	14,3	14,7	12,2	28,8
11.30	8,3	18,0	14,5	13,8	11,7	27,9
12.00	8,1	19,2	11,7	14,1	15,6	28,2
12.30	8,5	20,4	12,6	14,9	15,8	30,1
13.00	9,2	21,6	12,3	14,8	14,9	29,2
13.30	6,9	21,3	11,9	11,5	14,8	28,3

Intensitas Matahari Rata – Rata Aliran Kontinu Hari Kedua

$$\begin{aligned}
 \text{Pin rata-rata} &= 178,4 \text{ Fc} \times \frac{10,76 \text{ lux}}{1 \text{ Fc}} \times \frac{0,001464 \text{ Watt/m}^2}{1 \text{ lux}} \\
 &= 2,810 \text{ Watt/m}^2
 \end{aligned}$$



Gambar 30. Sel fotovoltaik: tampak depan (kiri) dan tampak atas (kanan)



Gambar 31. Spektrum serapan UV-Vis larutan KI (anoda) sel fotovoltaik sebelum Penyinaran (awal)

Tabel 9. Hubungan arus dan tegangan dalam karakterisasi kinerja sel 5

Arus (mA)	Tegangan (mV)		
0,001	80,9	0,036	24,8
0,002	80,6	0,037	24,1
0,003	79,8	0,038	23,4
0,004	78,3	0,039	22,7
0,005	76,9	0,04	22
0,006	73,6	0,041	21,2
0,007	72,7	0,042	20,6
0,008	68,5	0,043	20
0,009	66,4	0,044	19,4
0,01	65,2	0,045	18,7
0,011	64,3	0,046	18,3
0,012	62,6	0,047	17,5
0,013	61,3	0,048	16,5
0,014	59,5	0,049	15,8
0,015	58,2	0,05	15,3
0,016	57,1	0,051	14,6
0,017	55	0,052	13,8
0,018	53,1	0,053	12,6
0,019	46,5	0,054	12
0,02	45,8	0,055	11
0,021	45	0,056	10,3
0,022	43	0,057	9,7
0,025	41,8	0,058	9,2
0,027	38,2	0,059	8,7
0,028	34,5	0,06	7,9
0,029	34,1	0,061	7,3
0,03	29,4	0,062	7
0,031	28,5	0,063	6,5
0,032	27,9	0,085	0
0,033	27,3		
0,034	26,5		
0,035	25,8		

Penentuan Daya Maksimum (P_{maks})

$$\begin{aligned} P_{maks} &= I_{maks} \times V_{maks} \\ &= (0,025 \times 10^{-3} \text{ A}) \times (41,8 \times 10^{-3} \text{ V}) \\ &= 1,045 \times 10^{-6} \text{ Watt} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Luas permukaan elektroda} &= p \times l \\ &= (25 \times 10^{-3} \text{ m}) \times (2,7 \times 10^{-3} \text{ m}) \\ &= 6,750 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \end{aligned}$$

$$P_{maks} \text{ per satuan luas} = \frac{1,045 \times 10^{-6} \text{ Watt}}{6,75 \times 10^{-5} \text{ m}^2} = 0,016 \text{ Watt/m}^2$$

Penentuan Intensitas Matahari (P_{in})

$$\begin{aligned} P_{in} &= 183,7 \text{ Fc} \times \frac{10,76 \text{ lux}}{1 \text{ Fc}} \times \frac{0,001464 \text{ Watt/m}^2}{1 \text{ lux}} \\ &= 2,894 \text{ Watt/m}^2 \end{aligned}$$

Penentuan *Fill Factor* (FF)

$$\begin{aligned} FF &= \frac{V_{maks} \times I_{maks}}{V_{oc} \times I_{sc}} \\ &= \frac{41,8 \text{ mV} \times 0,025 \text{ mA}}{80,9 \text{ mV} \times 0,085 \text{ mA}} \\ &= 0,152 \end{aligned}$$

Penentuan Efisiensi Konversi ()

$$\begin{aligned} &= \frac{P_{maks}}{P_{in}} \times 100 \% \\ &= \frac{0,016 \text{ Watt/m}^2}{2,894 \text{ Watt/m}^2} \times 100 \% \\ &= 0,553 \% \end{aligned}$$

