



TUGAS AKHIR TF141581

**FABRIKASI *DYE-SENSITIZED SOLAR CELL* (DSSC)
BERSTRUKTUR *BILAYER ANATASE* TiO₂ DALAM
RANGKAIAN SERI DAN PARALEL**

NUR ABDILLAH SIDDIQ
NRP. 2411 100 081

Dosen Pembimbing
Dr.-Ing. Doty Dewi Risanti, S.T., M.T.
Dyah Sawitri, S.T., M.T.

JURUSAN TEKNIK FISIKA
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2015



FINAL PROJECT TF141581

**FABRICATION OF DYE-SENSITIZED SOLAR
CELL (DSSC) WITH ANATASE TiO₂ BILAYER
STRUCTURE CONNECTED IN SERIES AND
PARALLEL**

NUR ABDILLAH SIDDIQ
NRP. 2411 100 081

Supervisor
Dr.-Ing. Doty Dewi Risanti, ST, MT
Dyah Sawitri, ST, MT

DEPARTMENT OF ENGINEERING PHYSICS
Faculty of Industrial Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2015

**FABRIKASI DYE-SENSITIZED SOLAR CELL (DSSC)
BERSTRUKTUR BILAYER ANATASE TiO₂ DALAM
RANGKAIAN SERI DAN PARALEL**

TUGAS AKHIR

Oleh :
Nur Abdillah Siddiq
NRP : 2411 100 081

Surabaya, 3 Juni 2015
Mengetahui/Menyetujui

Pembimbing I

Pembimbing II


Dr.-Ing. Doty Dewi R., S.T., M.T.
NIPN. 19740903 199802 2 001


Dyah Sawitri, S.T., M.T.
NIPN. 19700101 199512 2 001


**Ketua Jurusan
Teknik Fisika FTI-ITS**

Dr. Ir. Totok Soehartanto, DEA
NIPN. 19650309 199002 1 001

**FABRIKASI DYE-SENSITIZED SOLAR CELL (DSSC)
STRUKTUR BILAYER ANATASE TiO₂ DALAM
RANGKAIAN SERI DAN PARALEL**

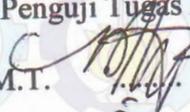
TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Bidang Studi Rekayasa Bahan
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

NUR ABDILLAH SIDDIQ
NRP. 2411 100 081

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Dr.-Ing. Doty D R., S.T., M.T.  (Pembimbing I)
2. Dyah Sawitri, S.T., M.T.  (Pembimbing II)
3. Ir. Agung Budiono, M.Eng.  (Ketua Penguji)
4. Lizda J. M., S.T., M.T.  (Penguji I)
5. Detak Yan Pratama S.T., M.Sc.  (Penguji II)
6. Bagus T. A., S.T., M.T.  (Penguji III)

**SURABAYA
JUNI 2015**

FABRIKASI *DYE-SENSITIZED SOLAR CELL* (DSSC) BERSTRUKTUR *BILAYER* ANATASE TiO_2 DALAM RANGKAIAN SERI DAN PARALEL

Nama Mahasiswa : Nur Abdillah Siddiq
NRP : 2411 100 081
Jurusan : Teknik Fisika FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Dr.-Ing Doty Dewi Risanti, ST, MT
Dyah Sawitri, ST, MT

Abstrak

Telah dilakukan penelitian mengenai pengaruh rangkaian seri, paralel, dan gabungan keduanya terhadap unjuk kerja DSSC berstruktur *bilayer* anatase TiO_2 . Enam DSSC difabrikasi dengan *dye* berasal dari ekstrak kulit manggis, dua jenis TiO_2 fase anatase yang berbeda ukuran disintesis melalui metode kopresipitasi, pelapisan dua kali pada kaca TCO untuk mendapatkan struktur *bilayer* menggunakan metode *doctor blade*, dan DSSC dirakit dengan struktur *sandwich*. Enam DSSC tersebut dirangkai menjadi 10 variasi rangkaian. Pengujian yang dilakukan meliputi pengujian XRD, pengujian unjuk kerja setiap DSSC berstruktur *bilayer* dengan uji IPCE dan uji arus-tegangan, dan unjuk kerja setiap rangkaian dengan uji arus-tegangan. Untuk mendapatkan parameter-parameter yang mempengaruhi efisiensi DSSC, dilakukan pemodelan dengan rangkaian ekuivalen satu dioda. Uji XRD menunjukkan bahwa dua jenis TiO_2 yang telah disintesis merupakan TiO_2 fase anatase dengan ukuran 5,43 nm dan 49,26 nm. Uji IPCE setiap DSSC menunjukkan nilai IPCE yang tinggi berada pada rentang 350 – 500 nm dengan nilai tertinggi 0,02407%. Uji arus-tegangan pada setiap DSSC menghasilkan efisiensi 0,0087% hingga 0,0327% berdasarkan daya cahaya matahari dari *pyranometer*. Uji arus-tegangan pada setiap rangkaian menghasilkan efisiensi terbesar pada rangkaian 9 yakni setiap 2 sel diparalel kemudian diseri menjadi satu sebesar 0,0366%. Nilai efisiensi terbesar diperoleh pada rangkaian gabungan seri dan paralel dengan susunan DSSC yang simetris.

Kata kunci: DSSC, *bilayer*, TiO_2 anatase, rangkaian seri paralel, efisiensi

FABRICATION OF DYE-SENSITIZED SOLAR CELL (DSSC) WITH ANATASE TiO₂ BILAYER STRUCTURE CONNECTED IN SERIES AND PARALLEL

Name : Nur Abdillah Siddiq
NRP : 2411 100 081
Department : Engineering Physics FTI-ITS
Supervisor : Dr.-Ing Doty Dewi Risanti, ST, MT
Dyah Sawitri, ST, MT

Abstract

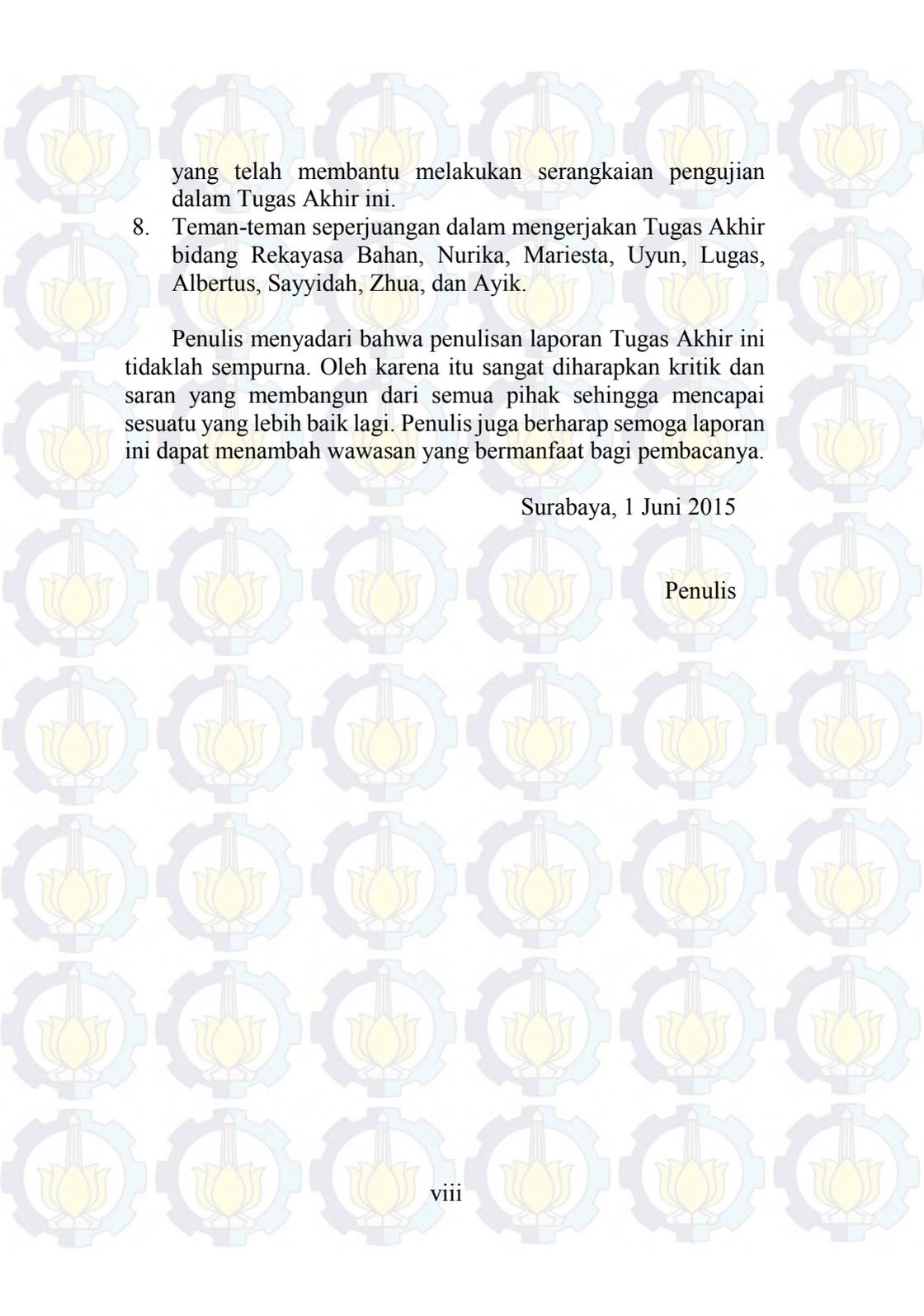
Solar cell may be connected in series, parallel, or both to obtain the required voltage and current. This work aimed at studying the effect of the connection type of six DSSCs to obtain the highest conversion energy. DSSC module were fabricated using mangosteen extract dye, two types of anatase TiO₂ with different sizes were synthesized through coprecipitation method. Bilayer structure were coated on TCO glass through doctor blade method, and each DSSC was assembled in sandwich structure. The six DSSCs were connected in 10 circuit variation. XRD was employed for characterizing the phase and crystallite size of the synthesized TiO₂. The obtained phase was anatase with crystallite size of 5.43 nm and 49.26 nm as estimated according to the Scherrer's equation. Performance of each DSSC anatase bilayer structure through IPCE and voltage-current test. The IPCE maximum of each DSSC in the range of 350-500 nm indicating the absorption characteristics of anthocyanin pigment being attached on TiO₂ surface. Individual DSSC shows efficiency between 0.0087% and 0.0327%. Six DSSCs were connected in series or parallel to construct the DSSC module, which has an increased in voltage and current. It is shown that by connecting DSSCs in combination of series and parallel symmetrical, highest power conversion efficiency is achieved up to 0.0366%.

Keywords: *DSSC, bilayer, anatase TiO₂, series parallel connection, efficiency*

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, segala puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT atas limpahan rahmat dan hidayah-Nya serta shalawat dan salam kepada Nabi Muhammad SAW sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul “**Fabrikasi *Dye-Sensitized Solar Cell (DSSC) Berstruktur Bilayer Anatase TiO₂ Dalam Rangkaian Seri Dan Paralel***” dengan lancar dan tepat waktu. Penulis telah banyak mendapatkan bantuan, arahan, bimbingan dari berbagai pihak dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Bapak Dr. Ir. Totok Soehartanto, DEA, selaku Ketua Jurusan Teknik Fisika ITS dan Bapak Dr. Ir. Ali Musyafa, M.Sc, selaku dosen wali penulis yang telah sabar memberikan petunjuk, bimbingan, serta ilmu yang sangat bermanfaat.
2. Ibu Dr. Ing Doty Dewi Risanti, ST, MT, selaku dosen pembimbing I dan Ibu Dyah Sawitri, ST, MT, selaku dosen pembimbing II yang telah sabar dalam memberikan dukungan, bimbingan dan arahan dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
3. Bapak Ir. Zulkifli, MSc, selaku kepala Laboratorium Rekayasa Bahan yang telah memberikan dukungan untuk menyelesaikan Tugas Akhir ini.
4. Bapak dan Ibu dosen Teknik Fisika yang telah memberikan ilmu selama kuliah yang semoga tidak hanya bermanfaat di dunia saja melainkan juga di akhirat.
5. Bapak Fajar Rahman, Ibu Sri Tumiasih, dan seluruh keluarga tercinta yang selalu memberi motivasi dan mendoakan penulis dimanapun berada.
6. Mas Dipta Nusbanga yang membantu mengajari cara menggunakan Matlab dalam menyelesaikan persamaan yang membutuhkan metode numerik dalam tugas akhir ini.
7. Laboratorium Rekayasa Bahan Teknik Fisika ITS dan Laboratorium XRD Jurusan Teknik Material dan Metalurgi



yang telah membantu melakukan serangkaian pengujian dalam Tugas Akhir ini.

8. Teman-teman seperjuangan dalam mengerjakan Tugas Akhir bidang Rekayasa Bahan, Nurika, Mariesta, Uyun, Lugas, Albertus, Sayyidah, Zhua, dan Ayik.

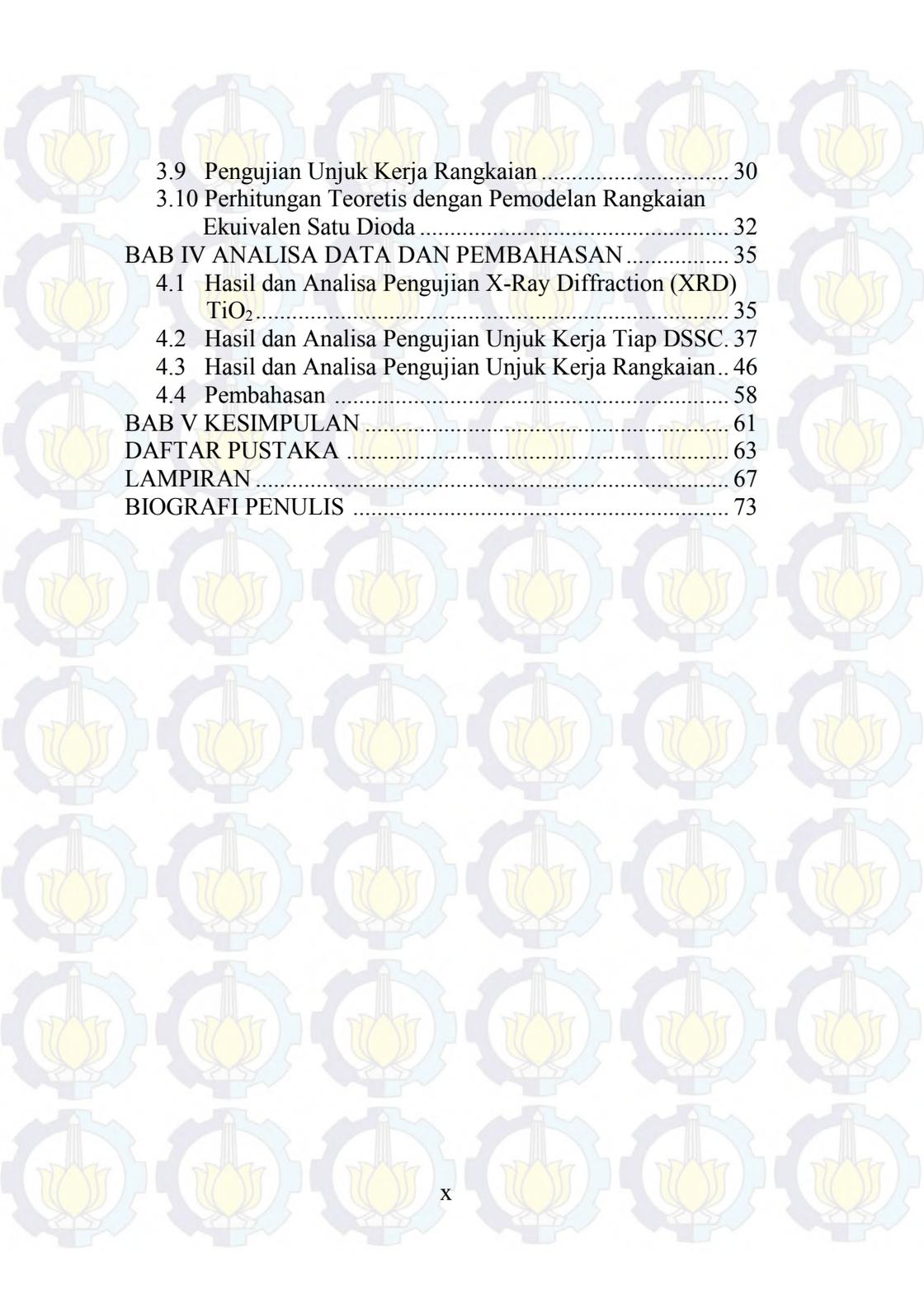
Penulis menyadari bahwa penulisan laporan Tugas Akhir ini tidaklah sempurna. Oleh karena itu sangat diharapkan kritik dan saran yang membangun dari semua pihak sehingga mencapai sesuatu yang lebih baik lagi. Penulis juga berharap semoga laporan ini dapat menambah wawasan yang bermanfaat bagi pembacanya.

Surabaya, 1 Juni 2015

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL.....	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	iii
ABSTRAK.....	v
ABSTRACT.....	vi
KATA PENGANTAR.....	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR TABEL.....	xiv
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan.....	3
1.4 Batasan Masalah.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Prinsip Kerja <i>Dye-Sensitized Solar Cell</i> (DSSC).....	5
2.2 Prinsip kerja DSSC Berstruktur Bilayer.....	6
2.3 Pengujian Unjuk Kerja DSSC.....	7
2.4 Konfigurasi DSSC.....	11
2.5 Pemodelan Matematis DSSC dengan Rangkaian Ekuivalen Satu Dioda.....	12
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	19
3.1 Persiapan Alat dan Bahan.....	20
3.2 Ekstraksi Pewarna Kulit Manggis.....	21
3.3 Sintesis TiO ₂ dengan Metode Kopersipitasi.....	22
3.4 Karakterisasi TiO ₂ dengan Pengujian XRD.....	23
3.5 Pelapisan TiO ₂ pada Kaca <i>Transparent Conductive Oxide</i> (TCO).....	25
3.6 Perendaman Kaca TCO Berlapis TiO ₂ di Larutan Pewarna.....	26
3.7 Perakitan DSSC.....	27
3.8 Pengujian Unjuk Kerja DSSC.....	29



3.9 Pengujian Unjuk Kerja Rangkaian	30
3.10 Perhitungan Teoretis dengan Pemodelan Rangkaian Ekuivalen Satu Dioda	32
BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN	35
4.1 Hasil dan Analisa Pengujian X-Ray Diffraction (XRD) TiO ₂	35
4.2 Hasil dan Analisa Pengujian Unjuk Kerja Tiap DSSC	37
4.3 Hasil dan Analisa Pengujian Unjuk Kerja Rangkaian	46
4.4 Pembahasan	58
BAB V KESIMPULAN	61
DAFTAR PUSTAKA	63
LAMPIRAN	67
BIOGRAFI PENULIS	73

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1	Ukuran Kristal TiO ₂	Hal 36
Tabel 4.2	Hasil Pengukuran J_{sc} , V_{oc} , <i>Fill Factor</i> , dan Daya Maksimal (P_{max}) pada Setiap DSSC	40
Tabel 4.3	Hasil Perhitungan R_s Setiap DSSC	42
Tabel 4.4	Hasil Perhitungan Efisiensi Berdasarkan <i>Luxmeter</i> dan <i>Pyranometer</i> pada Setiap DSSC	45
Tabel 4.5	Hasil Pengukuran J_{sc} , V_{oc} , <i>Fill Factor</i> , dan P_{max} pada Setiap Rangkaian	48
Tabel 4.6	Hasil Perhitungan R_s Setiap Rangkaian	49
Tabel 4.7	Hasil Perhitungan Efisiensi Berdasarkan <i>Luxmeter</i> dan <i>Pyranometer</i> pada Setiap Rangkaian	50
Tabel 4.8	Faktor Pengali Arus dan Tegangan pada Setiap Rangkaian	51

DAFTAR GAMBAR

		Hal
Gambar 2.1	Prinsip kerja dan skema tingkatan energi DSSC	5
Gambar 2.2	Semikonduktor oksida yang disusun <i>bilayer</i> dengan ukuran partikel yang berbeda	7
Gambar 2.3	Contoh spektrum IPCE	8
Gambar 2.4	Contoh kurva I-V pada DSSC	9
Gambar 2.5	Rangkaian listrik ekuivalen untuk mengukur I_{SC} dan V_{OC} pada DSSC	10
Gambar 2.6	Konfigurasi DSSC pada penelitian yang pernah dilakukan	11
Gambar 2.7	Rangkaian ekuivalen untuk pemodelan matematis DSSC dengan 1 dioda	12
Gambar 2.8	Perbandingan pengujian arus-tegangan (a) Pengukuran menggunakan hambatan geser (b) Pengukuran dan pemodelan	14
Gambar 2.9	Perbandingan pengaruh hambatan seri (R_s) dan hambatan paralel (R_{sh}) terhadap kurva I-V	15
Gambar 2.10	Perbandingan kurva I-V pada kondisi ideal (garis biru) dan kurva I-V karena adanya hambatan seri (garis merah)	16
Gambar 3.1	Skema diagram alir penelitian	20
Gambar 3.2	Alat dan bahan yang digunakan (a) Beberapa alat yang digunakan dalam penelitian (b) Kulit manggis sebagai bahan yang digunakan sebagai <i>dye</i>	21
Gambar 3.3	Ekstraksi pewarna kulit manggis (a) Bubuk kulit manggis (b) Proses pengadukan dengan <i>magnetic stirrer</i> (c) Penyaringan ekstrak kulit manggis	22
Gambar 3.4	Proses sintesis TiO_2 (a) Larutan saat ditambah HCl 37% (b) Larutan saat	23

	ditambah NH_4OH 25% (c) Larutan mulai menghasilkan endapan	
Gambar 3.5	Skema pengujian XRD	24
Gambar 3.6	Pelapisan pasta TiO_2 pada Kaca TCO dengan menggunakan metode <i>doctor blade</i> (dilakukan dua kali untuk mendapatkan struktur bilayer)	26
Gambar 3.7	Hasil perendaman kaca TCO berlapis TiO_2 dan pewarna kulit manggis (fabrikasi 6 DSSC)	27
Gambar 3.8	Perakitan DSSC (a) Penumpukan kaca TCO yang berlapis TiO_2 dan pewarna dengan kaca TCO berlapis grafit/platina (b) Struktur sandwich DSSC berstruktur <i>bilayer</i>	28
Gambar 3.9	DSSC bersruktur <i>bilayer</i> yang telah difabrikasi dengan struktur <i>sandwich</i>	28
Gambar 3.10	Skema pengujian IPCE	29
Gambar 3.11	Pengukuran arus dan tegangan di bawah cahaya matahari	30
Gambar 3.12	Variasi 10 rangkaian DSSC	31
Gambar 3.13	Pengujian arus dan tegangan rangkaian	32
Gambar 4.1	Hasil XRD TiO_2	35
Gambar 4.2	Spektrum IPCE DSSC berstruktur bilayer anatase TiO_2	38
Gambar 4.3	Kurva I-V DSSC (a) Pengukuran sebenarnya dengan hambatan geser (b) Perhitungan teoretis dengan $n=1$	39
Gambar 4.4	Perbandingan kurva I-V teoretis dengan R_s dan kurva I-V pengukuran pada setiap DSSC	43
Gambar 4.5	Kurva I-V DSSC 1 dengan nilai n yang bervariasi	44
Gambar 4.6	Kurva I-V rangkaian (a) Pengukuran sebenarnya dengan hambatan geser (b) Pemodelan rangkaian ekuivalen satu dioda	47

Gambar 4.7	Perbandingan efisiensi tertinggi, terendah, dan sebenarnya dari setiap rangkaian 550°C	52
Gambar 4.8	Kurva I-V DSSC terangkai seri	53
Gambar 4.9	Arus dan tegangan rangkaian seri (a) Rapat arus (J_{sc}) rangkaian seri (b) Tegangan (V_{oc}) rangkaian seri	55
Gambar 4.10	Kurva I-V DSSC terangkai paralel	56
Gambar 4.11	Arus dan tegangan rangkaian paralel (a) Rapat arus (J_{sc}) rangkaian paralel (b) Tegangan (V_{oc}) rangkaian paralel	57

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sel surya pewarna tersensitisasi atau *dye-sensitized solar cell* (DSSC) merupakan sel surya yang mudah dan murah dalam fabrikasinya [1]. DSSC terdiri dari molekul *dye* (pewarna), semikonduktor oksida yang memiliki pita celah lebar, *transparent conducting oxide* (TCO), dan elektrolit [2]. Di antara sekian banyak semikonduktor oksida yakni TiO_2 , ZnO , SnO_2 , In_2O_3 , dan Nb_2O_3 , Titanium dioksida (TiO_2) populer digunakan karena *photoreactivity*-nya yang tinggi, tidak beracun, stabil, dan harganya yang ekonomis [3].

Aktivitas dan unjuk kerja TiO_2 bergantung pada berbagai macam parameter seperti kristalinitas, impuritas, luas permukaan, dan kerapatan dari gugus hidroksi di permukaan [3]. TiO_2 merupakan semikonduktor yang baik untuk DSSC karena memiliki pita celah sebesar 3,2 eV untuk fase anatase dan 3,0 eV untuk fase rutile [4]. Secara umum, TiO_2 memiliki tiga fase yaitu anatase, rutile dan brookite. Di antara tiga fase tersebut, rutile adalah fase yang stabil secara termodinamik dan pita celahnya sesuai dengan penyerapan spektrum cahaya matahari, namun tidak secara luas digunakan pada DSSC. Sedangkan anatase memiliki konduktivitas listrik yang lebih tinggi, kemampuan untuk mengadsorpsi pewarna lebih banyak, dan koefisien difusi elektronnya lebih tinggi dibandingkan rutile. Selain itu pita celah anatase lebih tinggi 0,2 eV dari rutile sehingga nilai maksimum tegangan *open circuit*-nya lebih besar. Brookite sulit untuk dipreparasi sehingga tidak digunakan pada DSSC [4].

Aplikasi TiO_2 pada DSSC adalah TiO_2 berukuran nanometer digunakan untuk meningkatkan penyerapan *dye* karena luas permukaannya besar sedangkan lapisan TiO_2 berukuran submikrometer atau nanometer yang lebih besar digunakan untuk membentuk lapisan penghambur cahaya [5,7]. Apabila kedua jenis TiO_2 tersebut disusun menjadi satu (*bilayer*), maka terjadi mekanisme lapisan TiO_2 berukuran nanometer menghasilkan

elektron tereksitasi lebih banyak dan TiO_2 berukuran submikrometer atau nanometer yang lebih besar menyebabkan jalur cahaya menjadi semakin panjang. DSSC berstruktur *bilayer* menunjukkan efisiensi konversi energi foton ke energi listrik yang lebih tinggi dibandingkan DSSC berstruktur *monolayer* [7]. Pada penelitian sebelumnya, DSSC berstruktur *bilayer* menggunakan semikonduktor TiO_2 yang terdiri dari fase anatase-rutile memiliki efisiensi 0,0819% sedangkan fase anatase-anatase memiliki efisiensi sebesar 0,2766% [7]. Oleh karena itu, mengacu pada penelitian sebelumnya maka pada penelitian tugas akhir ini akan difabrikasi DSSC berstruktur *bilayer* anatase TiO_2 .

Arus dan tegangan yang dihasilkan oleh sebuah DSSC saat ini relatif kecil sehingga efisiensi konversi energi yang dihasilkan juga kecil. Salah satu cara untuk meningkatkan arus dan tegangan DSSC adalah dengan cara menggabungkan beberapa DSSC menjadi susunan rangkaian DSSC. Rangkaian DSSC tersebut dihubungkan melalui konfigurasi tertentu baik secara seri, paralel, maupun gabungan keduanya. Bentuk rangkaian DSSC dapat mempengaruhi efisiensi yang dihasilkan. Pada penelitian sebelumnya [8], digunakan 4 DSSC yang dirangkai dengan konfigurasi berbeda-beda didapatkan efisiensi terbesar 0,2103% pada rangkaian gabungan seri dan paralel. Oleh karena itu, pada tugas akhir ini akan diteliti pula mengenai pengaruh rangkaian seri, paralel, dan gabungan keduanya terhadap efisiensi konversi energi listrik yang dihasilkan.

1.2 Permasalahan

Permasalahan yang diangkat dalam tugas akhir ini antara lain:

- Bagaimana proses fabrikasi DSSC berstruktur *bilayer* anatase TiO_2 yang menghasilkan efisiensi terbesar?
- Bagaimana pengaruh rangkaian seri, paralel, dan gabungan keduanya terhadap unjuk kerja DSSC berstruktur *bilayer* anatase TiO_2 ?

1.3 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menjawab permasalahan yang telah dikemukakan, yakni:

- Untuk mengetahui proses fabrikasi DSSC berstruktur *bilayer* anatase TiO₂ yang menghasilkan efisiensi terbesar.
- Untuk mengetahui pengaruh rangkaian seri, paralel, dan gabungan keduanya terhadap unjuk kerja DSSC berstruktur *bilayer* anatase TiO₂.

1.4 Batasan Masalah

Untuk mempertajam dan memfokuskan permasalahan dalam tugas akhir ini, beberapa batasan masalah yang diambil diantaranya adalah sebagai berikut:

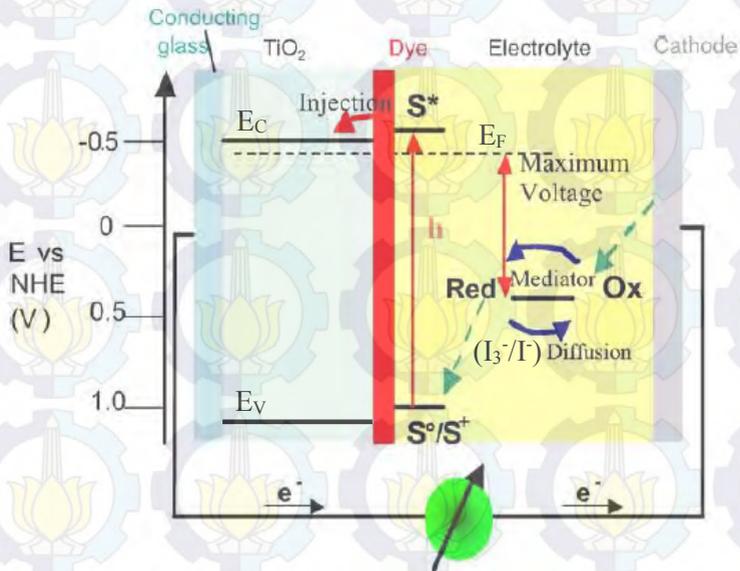
- *Dye* yang digunakan berasal dari ekstrak kulit buah manggis.
- *Dye* tidak dilakukan uji UV-Vis karena proses ekstraksi sama seperti penelitian-penelitian sebelumnya [7, 9, 20].
- Komposisi TiO₂ pada *bilayer* adalah 100% anatase dengan ukuran nanometer pada lapisan atas dan ukuran submikrometer/nanometer yang lebih besar pada lapisan bawahnya.
- Pelapisan TiO₂ pada kaca *transparent conducting oxide* (TCO) menggunakan metode *doctor blade*.
- Banyaknya DSSC yang difabrikasi untuk dikonfigurasi secara seri, paralel, atau campuran sebanyak 6 sel.
- Perhitungan teoretis unjuk kerja DSSC menggunakan pemodelan rangkaian ekuivalen 1 dioda.
- Unjuk kerja DSSC diteliti melalui uji *Incident Photon to Current Conversion Efficiency* (IPCE) dan uji arus-tegangan.
- Unjuk kerja rangkaian diteliti melalui uji arus-tegangan.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB II DASAR TEORI

2.1 Prinsip Kerja *Dye-Sensitized Solar Cell* (DSSC)

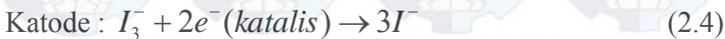
DSSC dapat disetarakan dengan proses fotosintesis karena pewarna (*dye*) menggantikan peranan klorofil sebagai pengumpul cahaya untuk memproduksi elektron tereksitasi, TiO_2 menggantikan peranan karbon dioksida sebagai akseptor elektron, *iodide/triiodide* menggantikan air dan oksigen sebagai donor elektron, dan kaca TCO menggantikan peranan daun sebagai media [9].



Gambar 2.1 Prinsip kerja dan skema tingkatan energi DSSC [10]

Prinsip kerja dan skema tingkatan energi DSSC ditunjukkan oleh gambar 2.1. Ketika molekul *dye/sensitizer* (S) menyerap sejumlah foton dengan energi yang sesuai, maka terjadi proses fotoeksitasi dari *dye*. Proses fotoeksitasi adalah berpindahnya elektron secara eksitasi dari tingkat *highest occupied molecular orbital* (HOMO) ke tingkat *lowest*

unoccupied molecular orbital (LUMO) akibat energi cahaya. Elektron hasil fotoeksitasi diinjeksikan ke pita konduksi (E_C) TiO_2 . Kemudian elektron (e^-) ditransfer ke *conducting glass*, sirkuit eksternal, dan elektroda lawan (*cathode*). Elektron yang hilang pada *dye* diregenerasi oleh reaksi redoks yang terjadi pada mediator/elektrolit (I/I_3^-). Siklus tersebut terjadi secara berulang-ulang di bawah intensitas cahaya yang sesuai untuk menghasilkan energi listrik. Sifat dari operasional DSSC ini regeneratif selama tidak ada pengaruh zat kimia yang masuk maupun zat kimia yang diproduksi selama siklus sedang bekerja. Berikut adalah siklus operasi pada DSSC dalam bentuk reaksi kimia [10],



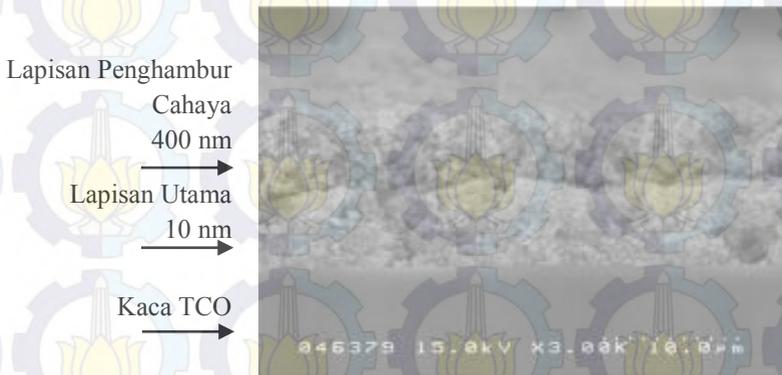
Besarnya potensial ditentukan terhadap elektrode hidrogen (*Normal Hydrogen Electrode/NHE*). Tegangan rangkaian terbuka (V_{OC}) DSSC ditentukan oleh perbedaan antara potensial redoks larutan elektrolit dan tingkatan energi Fermi (E_F) TiO_2 , sedangkan arus *short circuit* (I_{sc}) bergantung pada jumlah foton dari intensitas penyinaran dan unjuk kerja *dye* [10].

2.2 Prinsip kerja DSSC Berstruktur *Bilayer*

Prinsip kerja DSSC berstruktur *bilayer* sama seperti prinsip kerja DSSC berstruktur *monolayer* seperti yang telah dijelaskan pada sub-bab 2.1. Hal yang membedakan adalah pada struktur *bilayer* menggunakan dua lapis semikonduktor oksida, sedangkan pada struktur *monolayer* hanya satu lapis semikonduktor oksida.

DSSC berstruktur *bilayer* dapat dibuat dengan memfabrikasi dan menyusun 2 lapis semikonduktor oksida menjadi satu, dalam penelitian ini semikonduktor oksida tersebut adalah TiO_2 . TiO_2 berukuran nanometer sebagai lapisan utama

digunakan untuk meningkatkan penyerapan *dye* karena luas permukaannya besar sedangkan lapisan TiO_2 berukuran submikrometer atau nanometer yang lebih besar digunakan untuk membentuk lapisan penghambur cahaya [5,7]. Apabila kedua jenis TiO_2 tersebut disusun menjadi satu (*bilayer*), maka terjadi mekanisme lapisan TiO_2 berukuran nanometer menghasilkan elektron tereksitasi lebih banyak dan TiO_2 berukuran submikrometer atau nanometer yang lebih besar menyebabkan jalur cahaya menjadi semakin panjang. Susunan DSSC dengan struktur *bilayer* ditunjukkan oleh gambar 2.2.



Gambar 2.2 Semikonduktor oksida yang disusun *bilayer* dengan ukuran partikel yang berbeda [11]

2.3 Pengujian Unjuk Kerja DSSC

DSSC yang telah difabrikasi kemudian diuji *incident photon to current conversion efficiency* (IPCE) dan diuji arus-tegangan keluarannya. IPCE merupakan parameter untuk menentukan efisiensi konversi cahaya pada DSSC. IPCE digunakan untuk mengukur seberapa efektif konversi foton menjadi arus yang mengalir pada DSSC. IPCE akan bernilai 100% ketika semua foton menghasilkan pasangan elektron-hole. Namun pada kenyataannya IPCE selalu kurang dari 100% karena adanya refleksi foton, penyerapan elektron yang tidak sempurna oleh semikonduktor dan rekombinasi dalam semikonduktor.

Untuk menghitung nilai IPCE digunakan persamaan (2.5). Contoh dari spektrum IPCE ditunjukkan oleh gambar 2.3.

$$IPCE [\%] = \frac{1240 [eV \cdot nm] \times J_{sc} [\mu A \cdot cm^{-2}]}{\lambda [nm] \times P_{cahaya} [\mu W \cdot cm^{-2}]} \quad (2.5)$$

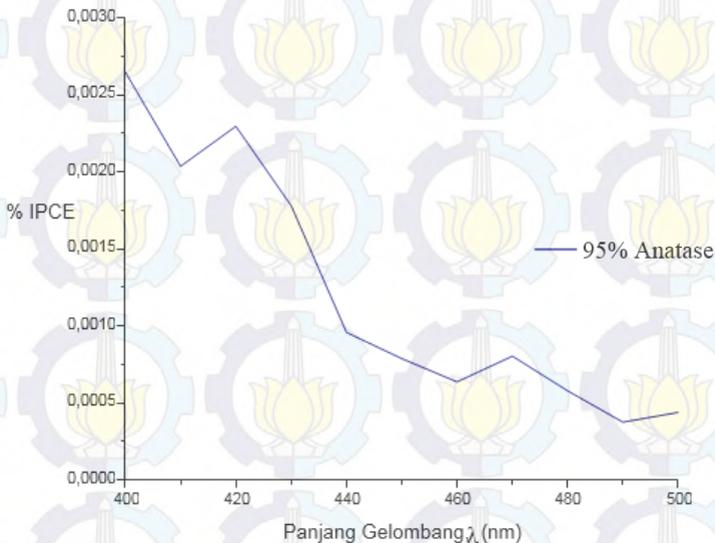
Dengan:

1240 = konstanta faktor konversi cahaya ke arus (eV nm)

J_{sc} = kerapatan arus ($\mu A \cdot cm^{-2}$)

λ = panjang gelombang yang diubah-ubah pada monokromator (nm)

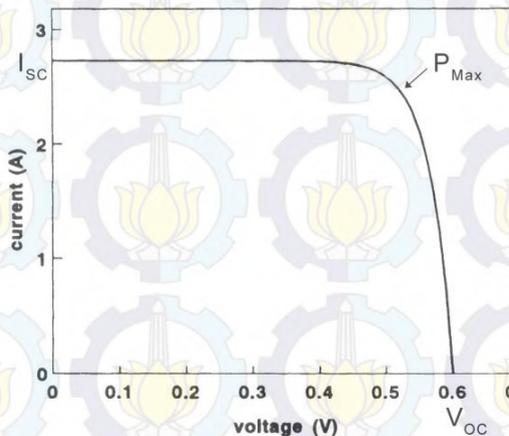
P_{cahaya} = daya yang diukur pada setiap panjang gelombang ($\mu W \cdot cm^{-2}$)



Gambar 2.3 Contoh spektrum IPCE [12]

Kemudian pengujian unjuk kerja DSSC selanjutnya adalah pengujian arus-tegangan. Pengujian arus-tegangan bertujuan untuk mengetahui bentuk kurva I-V, melalui kurva I-V dapat dihitung parameter-parameter penting DSSC seperti *fill factor* dan

efisiensi. Kurva I-V didapatkan dengan cara mengukur arus dan tegangan yang dihasilkan DSSC ketika disinari oleh matahari, contoh bentuk kurva I-V ditunjukkan pada gambar 2.4.



Gambar 2.4 Contoh kurva I-V pada DSSC [13]

Untuk mengukur arus *short circuit* (I_{sc}) dan tegangan *open circuit* (V_{oc}), digunakan rangkaian listrik ekuivalen yang ditunjukkan oleh gambar 2.5. A adalah posisi *multimeter* untuk mengukur arus dan V adalah posisi *multimeter* untuk mengukur tegangan. Pada pengukuran arus dan tegangan untuk mendapatkan kurva I-V, nilai yang diubah adalah hambatannya (R). Ketika hambatan yang diberikan maksimal maka tegangannya bernilai maksimal (V_{oc}) dan nilai arusnya mendekati 0, sedangkan apabila hambatan yang diberikan nilainya minimal maka arusnya menjadi maksimal (I_{sc}) dan tegangannya mendekati 0. Hal tersebut memenuhi hukum Ohm yang ditunjukkan oleh persamaan berikut,

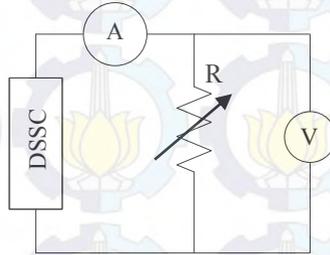
$$V = I \cdot R \quad (2.6)$$

Dengan:

V = tegangan (volt)

I = arus (ampere)

R = hambatan (Ω)



Gambar 2.5 Rangkaian listrik ekuivalen untuk mengukur I_{sc} dan V_{oc} pada DSSC

Dari kurva I-V (Gambar 2.4) dapat diketahui nilai *fill factor* (FF), *fill factor* merupakan parameter yang ikut menentukan efisiensi DSSC. Secara grafik *fill factor* adalah luas maksimum dari persegi panjang yang dapat dibentuk pada daerah dibawah kurva I-V. Daya maksimal (P_{max}) diperoleh dari hasil perhitungan perkalian arus dan tegangan terukur yang menghasilkan nilai terbesar. Untuk mengetahui nilai *fill factor* (FF) dapat menggunakan persamaan berikut [13],

$$FF = \frac{V_{MPP} \cdot I_{MPP}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \times 100\% \quad (2.7)$$

Dengan:

V_{MPP} = tegangan pada saat daya maksimal/*maximum power point* (volt)

I_{MPP} = arus pada saat daya maksimal/*maximum power point* (ampere)

V_{oc} = tegangan pada saat hambatan maksimal (volt)

I_{sc} = arus pada saat hambatan minimal (ampere)

Semakin tajam siku kurva I-V, maka nilai FF semakin mendekati 100% yang artinya unjuk kerja sel surya semakin baik dan efisiensi semakin tinggi. Nilai FF juga dapat menghitung daya listrik maksimum (P_{max}) yang dihasilkan oleh DSSC dengan persamaan (2.8). Kemudian untuk mengetahui efisiensi (η) dari DSSC dapat menggunakan persamaan (2.9).

$$P_{MAX} = V_{OC} \cdot I_{SC} \cdot FF \quad (2.8)$$

$$\eta = \frac{P_{MAX}}{P_{cahaya} \times A} \times 100\% \quad (2.9)$$

Dengan:

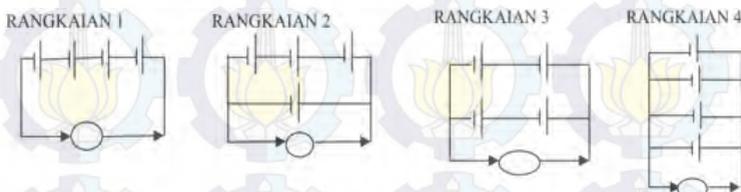
P_{max} = daya maksimal yang merupakan perhitungan perkalian arus dan tegangan terukur yang menghasilkan nilai terbesar (watt)

P_{cahaya} = daya cahaya matahari yang diukur melalui *pyranometer* atau luxmeter yakni (watt/m^2). Satu lux setara dengan 0.0079 W/m^2

A = luas permukaan DSSC (m^2)

2.4 Konfigurasi DSSC

Arus dan tegangan yang dihasilkan oleh sebuah DSSC saat ini relatif kecil sehingga efisiensi konversi energi listrik yang dihasilkan juga kecil. Untuk meningkatkan arus dan tegangan DSSC, salah satunya dengan cara menggabungkan beberapa DSSC menjadi susunan rangkaian DSSC yang dihubungkan secara seri, paralel, maupun gabungan keduanya. Hubungan DSSC satu dengan lainnya pada suatu rangkaian dapat mempengaruhi efisiensi yang dihasilkan. Pada penelitian yang dilakukan oleh Ramadhani [8] didapatkan nilai efisiensi yang dihasilkan pada rangkaian 1, rangkaian 2, rangkaian 3, rangkaian 4 masing-masing sebesar 0,1619%, 0,1285%, 0,2103%, dan 0,1325%. Rangkaian DSSC dari penelitian tersebut ditunjukkan oleh gambar 2.6.

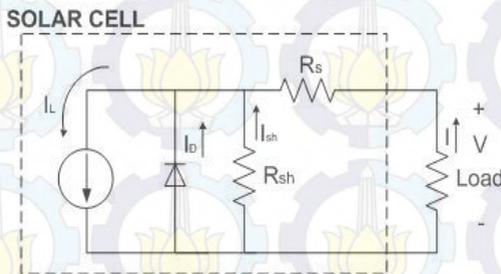


Gambar 2.6 Konfigurasi DSSC yang pernah dilakukan [8]

Rasio efisiensi terendah dan tertinggi sebesar 1,64 (perbandingan efisiensi rangkaian 3 dengan efisiensi rangkaian 2). Rasio efisiensi yang besar tersebut menandakan bahwa konfigurasi DSSC berperan sangat penting dalam menentukan efisiensi suatu rangkaian DSSC. Pada penelitian tersebut juga dapat disimpulkan bahwa DSSC yang disusun secara seri (rangkaiannya 1) menunjukkan efisiensi yang lebih besar dibandingkan DSSC yang disusun secara paralel (rangkaiannya 4). Selain itu DSSC yang disusun tidak simetris (rangkaiannya 2) menunjukkan nilai efisiensi yang terkecil.

2.5 Perhitungan Teoretis DSSC dengan Rangkaian Ekuivalen Satu Dioda

Perhitungan teoretis dengan model matematika sangat penting untuk pengoperasian DSSC yang menginginkan optimasi. Parameter yang dipakai dalam pemodelan dihitung berdasarkan data-data pengukuran pengujian arus dan tegangan. Perbedaan dalam pemodelan biasanya terletak pada jumlah dioda (satu dioda, dua dioda, atau lebih), hambatan seri dan paralelnya yang memiliki nilai atau diabaikan, faktor idealitas dioda yang bernilai 1, 2 atau lebih. Perbedaan pemodelan menyebabkan perbedaan dalam hal prosedur penyelesaian matematika dan banyaknya parameter yang terlibat.



Gambar 2.7 Rangkaian ekuivalen untuk pemodelan matematis DSSC dengan 1 dioda [14]

Gambar 2.7 adalah model rangkaian ekuivalen dengan 1 dioda. Digunakan rangkaian ekuivalen tersebut dikarenakan rangkaian ekuivalen yang standar untuk memodelkan sel surya atau DSSC adalah model rangkaian dengan 1 dioda [14], yang terdiri dari 1 dioda, arus jenuh dioda (I_o), hambatan seri (R_s) dan hambatan paralel (R_{sh}). Persamaan matematis dari rangkaian gambar 2.7 adalah (14):

$$I(V) = I_L - \frac{V - R_s I}{R_{sh}} - I_o \left\{ \exp \left[\frac{q(V - R_s I)}{nkT} \right] - 1 \right\} \quad (2.10)$$

Dengan:

I = arus yang hendak dicari nilainya sebagai fungsi dari tegangan (ampere), agar nilainya positif maka dikali dengan $-$ (minus).

V = tegangan dari hasil pengujian arus-tegangan (volt)

I_L = arus yang nilainya sama dengan I_{sc} (ampere)

I_o = arus jenuh dioda (Ampere), dihitung ketika nilai I pada persamaan (2.10) bernilai 0 dan V bernilai V_{oc} , sehingga I_o dapat dihitung dengan menyusun persamaan (2.10) menjadi:

$$I_o = \frac{I_L}{\exp\left(\frac{V_{oc}q}{nkT} - 1\right)} \quad (2.11)$$

R_s = hambatan seri (Ω)

R_{sh} = hambatan *shunt* atau paralel (Ω)

Q = muatan elektron sebesar $1,602 \times 10^{-19}$ Coulomb

K = konstanta Boltzmann sebesar $1,38 \times 10^{-23}$ J/K

n = faktor idealitas dioda, bernilai 1 ketika proses perpindahan elektronnya adalah difusi, sedangkan bernilai 2 ketika proses perpindahan elektronnya adalah rekombinasi pada daerah depleksi [14].

T = temperatur DSSC pada saat dioperasikan (K).

Dalam kondisi ideal, nilai R_s diasumsikan sangat kecil (mendekati nol) sehingga letak R_s sebagai pembilang pada persamaan 2.10 dapat diabaikan, sedangkan nilai R_{sh} sangat besar (mendekati tidak terhingga) sehingga letak R_{sh} sebagai penyebut

dipersamaan 2.10 dapat diabaikan. Penyederhaan persamaan (2.10) ketika nilai R_s dan R_{sh} diabaikan (keadaan ideal) ditunjukkan oleh persamaan berikut:

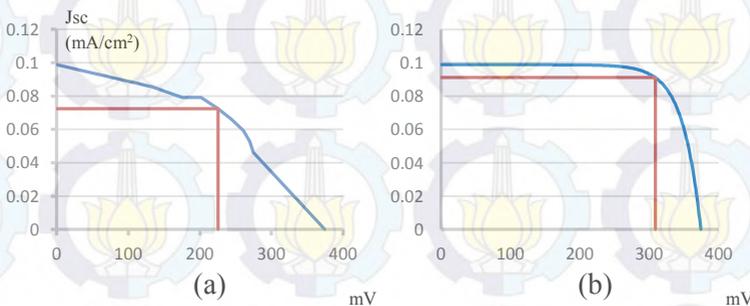
$$I = I_L - I_0 \left[\exp\left(\frac{Vq}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (2.12)$$

Untuk memperoleh daya maksimum pada kondisi ideal, dibutuhkan parameter V_{MPP} dan I_{MPP} . maka besarnya V_{MPP} dapat dihitung melalui persamaan (2.13), sedangkan I_{MPP} dapat diperoleh dengan memasukkan nilai V_{MPP} yang telah diperoleh dari persamaan (2.13) ke dalam persamaan (2.14).

$$V_{MPP} = V_{oc} - \left(\frac{nkT}{q}\right) \ln \left[\left(\frac{V_{oc}q}{nkT}\right) + 1 \right] \quad (2.13)$$

$$I_{MPP} = -I_L + I_0 \left[\exp\left(\frac{V_{MPP}q}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (2.14)$$

Gambar 2.8 menunjukkan perbedaan kurva I-V dari pengukuran langsung menggunakan hambatan geser (gambar 2.8a) dengan pengukuran langsung yang digabung dengan pemodelan satu dioda yang merupakan kurva I-V teoretis (gambar 2.8b). Dari gambar 2.8 dapat diamati bahwa kurva I-V teoretis (gambar 2.8b) menghasilkan *fill factor* yang lebih besar dibandingkan kurva I-V pengukuran. Secara grafik *fill factor* adalah luas maksimum dari persegi panjang yang dapat dibentuk pada daerah di bawah kurva I-V [13].

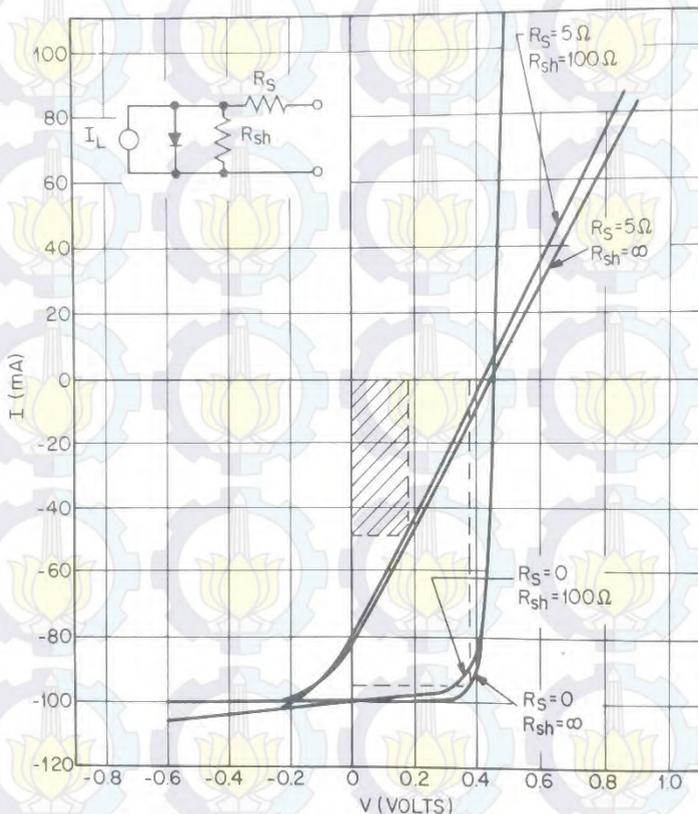


Gambar 2.8 Perbandingan pengujian arus-tegangan

(a) Pengukuran menggunakan hambatan geser

(b) Pengukuran dan pemodelan

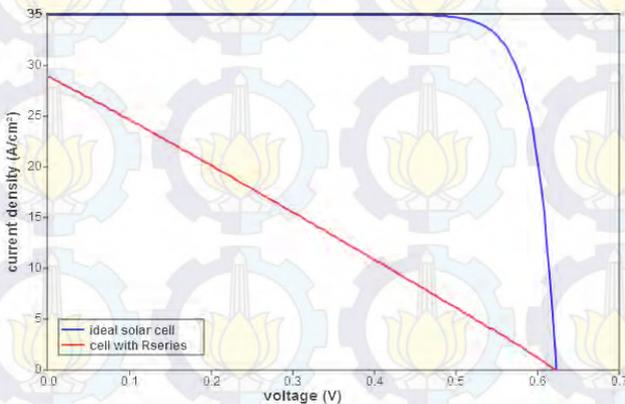
Gambar 2.8b menunjukkan kurva I-V teoretis yang ideal karena nilai R_s dan R_{sh} diabaikan. Padahal dalam kondisi sesungguhnya, asumsi tersebut tidaklah berlaku. Nilai R_{sh} hanya akan berubah menjadi mengecil nilainya ketika dioperasikan dalam kondisi intensitas cahaya yang rendah [16], sedangkan nilai R_s akan berubah menjadi membesar nilainya akibat ketebalan semikonduktor oksida, impuritas, dan kontak semikonduktor oksida dengan kaca TCO [17].



Gambar 2.9 Perbandingan pengaruh hambatan seri (R_s) dan hambatan paralel (R_{sh}) terhadap kurva I-V [18]

Gambar 2.9 menjelaskan bahwa perubahan hambatan paralel berpengaruh sangat kecil terhadap kurva I-V, perubahan nilai hambatan paralel dari yang awalnya sangat besar ($\infty\Omega$) menjadi 100Ω menyebabkan kurva I-V hanya berubah sedikit, sehingga biasanya hambatan paralel diabaikan [18].

Sedangkan pengaruh hambatan seri sangatlah besar terhadap bentuk kurva I-V, perubahan hambatan seri dari yang awalnya 0 menjadi 5Ω menyebabkan bentuk kurva I-V berubah drastis. Hambatan seri yang besar dapat menyebabkan menurunnya nilai *fill factor* [18]. Ketika nilai hambatan serinya besar maka perpindahan elektron akan lebih lambat dan akan mudah terjadi proses rekombinasi pada DSSC [19]. Proses rekombinasi adalah bertemunya elektron dan *hole*. Apabila nilai R_s diperhitungkan pada pemodelan berdasarkan persamaan (2.10), maka kurva I-V nya akan menjadi seperti gambar 2.10.



Gambar 2.10 Perbandingan kurva I-V pada kondisi ideal (garis biru) dan kurva I-V karena adanya hambatan seri (garis merah) [17]

Hubungan *fill factor* dengan hambatan seri (R_s) ditunjukkan oleh persamaan (2.15).

$$FF_s = FF_0 \left(1 - \frac{R_s}{R_{CH}}\right) \quad (2.15)$$

Dengan:

FF_0 = nilai FF teoretis yang didapatkan dari perhitungan berdasarkan persamaan 2.7 menggunakan kurva I-V teoretis

FF_s = nilai FF pengukuran yang didapatkan dari perhitungan berdasarkan persamaan 2.7 menggunakan kurva I-V pengukuran

R_{CH} = hambatan karakteristik yang merupakan rasio V_{oc} dan I_{sc} (memenuhi hukum ohm)

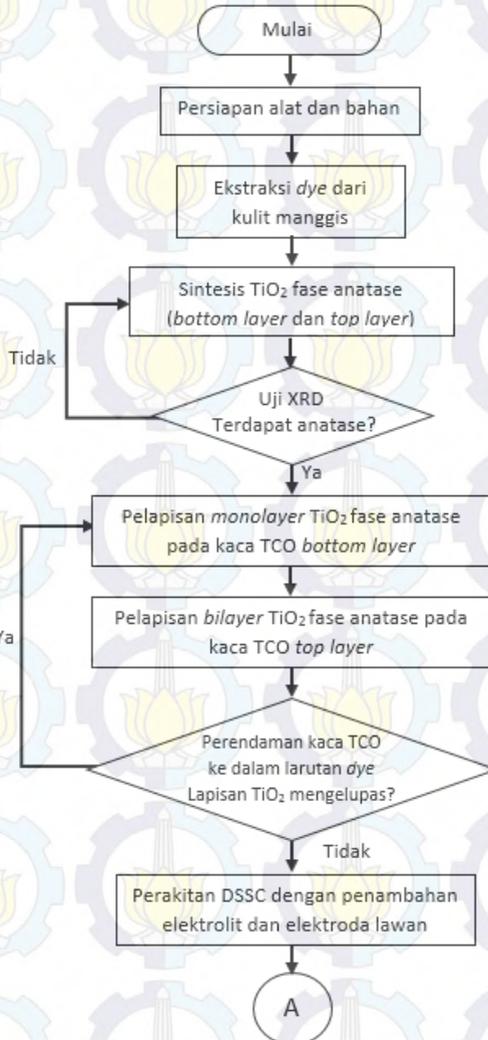
Persamaan (2.15) dapat digunakan untuk menentukan hambatan seri (R_s). Hambatan seri yang telah diketahui dapat dimasukkan ke dalam persamaan 2.10, sehingga kurva I-V pengukuran dapat didekati dengan kurva I-V teoretis yang memiliki hambatan seri.

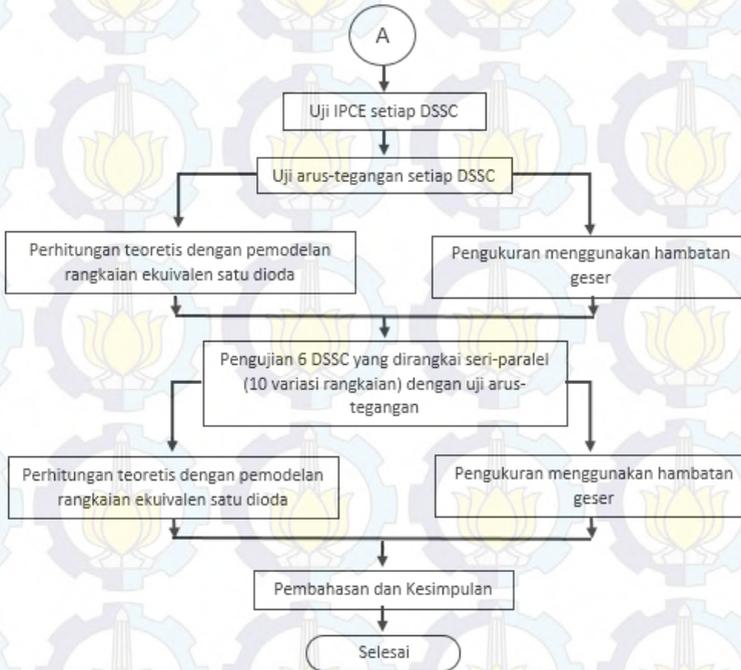
“Halaman ini sengaja dikosongkan”



BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Gambar 3.1 merupakan diagram alir penelitian yang dilakukan:





Gambar 3.1 Skema diagram alir penelitian

3.1 Persiapan Alat dan Bahan

Alat pada penelitian ini dibagi menjadi 2 kategori, yakni alat yang dipakai dalam fabrikasi DSSC berstruktur *bilayer* anatase TiO_2 dan alat yang dipakai dalam pembuatan variasi 10 rangkaian seri, paralel, dan gabungan keduanya. Beberapa alat yang diperlukan dalam fabrikasi DSSC adalah *crucible*, spatula, penggaris, pipet, gelas ukur, gelas beker, mortar, klip kertas, *furnace*, blender, *hot plate Yellow MAG HS7*, *magnetic stirrer*, (Gambar 3.2a). Sedangkan alat yang diperlukan dalam pembuatan 10 variasi rangkaian adalah *Printed Circuit Board (PCB)* jenis *Dot Matrix*, kabel jumper, solder, timah, jepitan buaya, dan hambatan geser tipe VR F637V dengan rentang 0-2000 Ω .



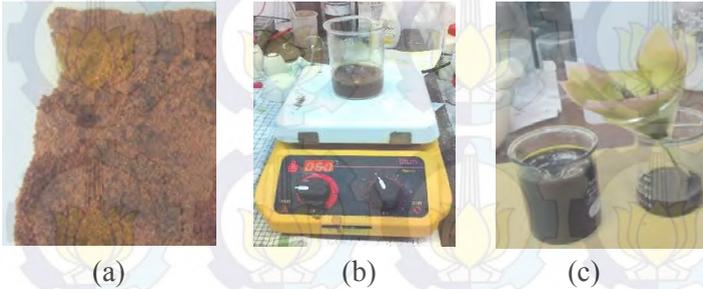
Gambar 3.2 (a) Beberapa alat yang digunakan dalam fabrikasi DSSC (b) Kulit manggis sebagai bahan yang digunakan sebagai dye

Bahan yang diperlukan untuk ekstrak pewarna alami adalah kulit manggis (gambar 3.2b), kertas saring, dan ethanol 96%. Sedangkan untuk sintesis TiO_2 memerlukan TiCl_3 15% (Merck), HCl 37%, NH_4OH 25%, dan akuades. Selanjutnya, bahan yang diperlukan untuk perakitan DSSC adalah CH_3COOH 98%, Triton X-100 (Merck), PEG MW 4000 (Brataco), *chloroform*, *acetonitril* (Hypersolv), *potassium iodide* (KI), iodine (I_2), pensil grafit, kaca *transparent conductive oxide* (hambatan lembaran $8 \Omega/\text{cm}^2$, ketebalan lapisan hambatan $\pm 10 \mu\text{m}$, Dyesol Inc.), dan *scotch tape*.

3.2 Ekstraksi Pewarna Kulit Manggis

Pada penelitian ini, bahan pewarna alami (*dye*) yang digunakan adalah ekstrak kulit manggis. Kulit manggis dikeringkan pada temperatur 80°C menggunakan *furnace* selama 10 jam. Kemudian kulit manggis yang sudah kering dihaluskan menggunakan blender hingga menjadi bubuk (Gambar 3.3a). Sebanyak 10 gram bubuk kulit manggis dilarutkan dalam 50 ml ethanol 96%. Selanjutnya larutan tersebut diaduk menggunakan *magnetic stirrer* pada temperatur 60°C selama 30 menit (Gambar 3.3b) [20]. Larutan yang telah diaduk didinginkan

selama 20 menit. Larutan tersebut disimpan di dalam botol gelap selama 7 hari kemudian disaring (Gambar 3.3c).



Gambar 3.3 Ekstraksi pewarna kulit manggis (a) Bubuk kulit manggis (b) Proses pengadukan dengan *magnetic stirrer* (c) Penyaringan ekstrak kulit manggis

3.3 Sintesis TiO_2 dengan Metode Kopresipitasi

Nanopartikel TiO_2 disintesis menggunakan metode kopresipitasi. Metode kopresipitasi merupakan metode sintesis *bottom up* yang digunakan untuk mendapatkan ukuran partikel kecil berukuran nanometer. Metode kopresipitasi dipilih untuk proses sintesis karena biayanya ekonomis, waktu yang dibutuhkan lebih singkat, dan ukuran partikel yang dihasilkan berukuran nanometer [21].

Gambar 3.4 merupakan hasil dari tahapan sintesis TiO_2 . TiCl_3 sebanyak 10 ml diaduk bersama dengan 4,7 ml akuades dan 0,3 ml HCl 37% menggunakan *magnetic stirrer* selama 2-3 menit pada temperatur 45°C dengan kecepatan 2 mod. Kemudian ditambahkan 20 ml HCl 37% dalam posisi terus mengaduk (Gambar 3.4a). Setelah larutan berwarna ungu encer kemudian ditambahkan NH_4OH 25% sebanyak 50 ml dan terus diaduk setiap 5 menit hingga berwarna ungu hitam (Gambar 3.4b). Pengadukan dihentikan sementara selama 5 menit dan diaduk kembali dengan penambahan NH_4OH sampai didapatkan larutan berwarna putih dan menghasilkan endapan (Gambar 3.4c). Larutan putih tersebut didiamkan selama kurang lebih 1

minggu dan dicuci menggunakan akuades sampai tidak berbau lagi [22].



Gambar 3.4 Proses sintesis TiO_2 (a) Larutan saat ditambah HCl 37% (b) Larutan saat ditambah NH_4OH 25% (c) Larutan mulai menghasilkan endapan

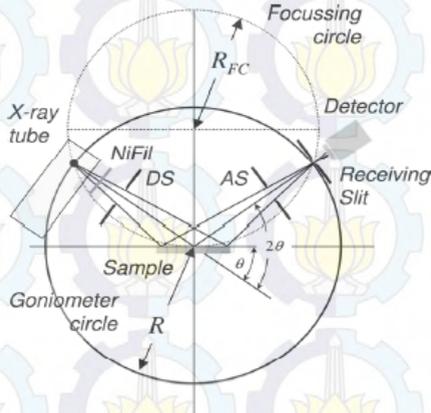
Selanjutnya dilakukan proses kalsinasi untuk mendapatkan serbuk TiO_2 . Proses kalsinasi dilakukan menggunakan 2 kondisi, kondisi 1 pada temperatur 200°C selama 4 jam untuk mendapatkan nanopartikel ukuran $<10\text{nm}$, dan kondisi 2 pada temperatur 550°C selama 4 jam untuk mendapatkan nanopartikel ukuran $>20\text{nm}$ [22]. Bubuk TiO_2 yang dihasilkan dari proses kalsinasi dihaluskan menggunakan mortar. TiO_2 yang dihasilkan diuji XRD, apabila terbentuk TiO_2 fase anatase maka dapat dilanjutkan pada tahap selanjutnya.

3.4 Karakterisasi TiO_2 dengan Pengujian XRD

Senyawa semikonduktor oksida yang telah disintesis kemudian diuji *X-ray diffraction* (XRD). XRD merupakan alat uji material yang memanfaatkan hamburan sinar-X untuk mengetahui ukuran partikel (kristal) sekaligus fasa TiO_2 yang telah disintesis [22].

Gambar 3.5 menunjukkan bahwa sampel yang diuji diletakkan tepat di tengah dan kemudian disinari sinar-X. Saat

pengujian, sampel akan berputar dari sudut terkecil sampai dengan sudut terbesar menurut pengaturan yang diinginkan. Sinar X yang ditembakkan pada sampel uji akan mengalami hamburan setelah bertumbukan dengan kristal dari sampel uji. Pengujian XRD menggunakan alat Philips MD-X'pert MPD dengan radiasi panjang gelombang Cu-K α pada sudut pendek 15°–65° yang dilakukan di laboratorium XRD Teknik Material dan Metalurgi ITS.



Gambar 3.5 Skema pengujian XRD [22]

Grafik karakteristik sampel yang diuji berupa besar intensitas terhadap sudut difraksi (2θ). Dari sudut difraksi dapat diketahui fase material yang terbentuk di dalam sampel uji. Untuk mengidentifikasi fasa yang terbentuk berdasarkan uji XRD digunakan *Joint Committee on Powder Diffraction Standards* (JCPDS) 21-1272 untuk TiO₂ fase anatase. Intensitas yang tinggi pada sudut difraksi tertentu menunjukkan bahwa material yang terkandung dalam sampel uji bersifat kristalin. Sebaliknya intensitas yang rendah pada sudut difraksi tertentu menunjukkan bahwa material yang terkandung dalam sampel uji bersifat *amorf*.

Ukuran partikel dihitung berdasarkan persamaan Scherrer yang mengacu pada hasil uji XRD [22]. Bentuk persamaan Scherrer ditunjukkan oleh persamaan (3.1).

$$D = \frac{0,92 \lambda}{FWHM \cos \theta} \quad (3.1)$$

Dengan:

- D = ukuran partikel rata-rata (nm) [11]
- λ = panjang gelombang Cu-K α sebesar 0,15406 nm
- FWHM = *Full Width-Half Maximum*/setengah lebar puncak tertinggi (radian)
- θ = sudut puncak yang digunakan (radian)

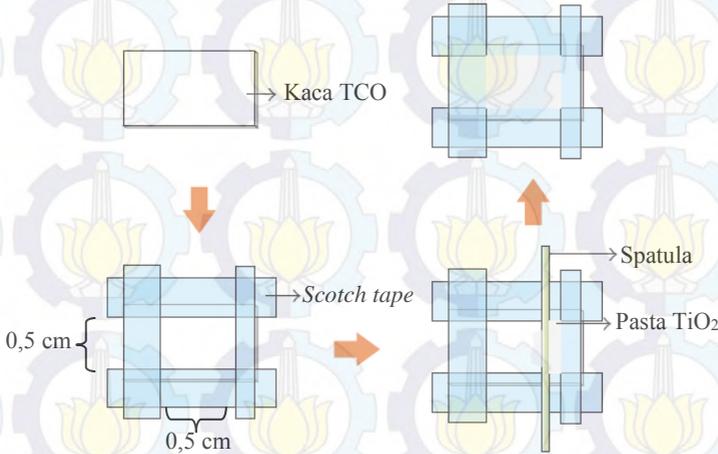
3.5 Pelapisan TiO₂ pada Kaca *Transparent Conductive Oxide* (TCO)

Pada tahap pelapisan TiO₂ di kaca TCO, TiO₂ harus terlebih dahulu dijadikan pasta dengan cara melarutkan 2 gram bubuk TiO₂ dalam 0,7 ml aquades sambil digerus di mortar. Kemudian ditambahkan 1 ml CH₃COOH 98% sambil terus dicampur hingga rata. Agar penyebarannya rata ketika dilapiskan di kaca TCO, maka perlu ditambahkan 0,1 ml Triton X-100 (3 tetes pipet). Proses pelapisan TiO₂ pada kaca TCO ditunjukkan oleh gambar 3.6.

Untuk melapiskan pasta TiO₂, kaca TCO harus dibersihkan dengan menggunakan ethanol 96%. Selanjutnya, sisi-sisi kaca dilapisi dengan *scotch tape* dengan membiarkan bagian tengahnya seluas 0,5 x 0,5 cm² tetap terlihat. Bagian tengah yang tidak dilapisi *scotch tape* merupakan bagian yang dilapisi pasta TiO₂. Pelapisan pertama (lapisan utama) adalah dengan TiO₂ yang berukuran <10nm. Setelah tahap pelapisan pertama (*monolayer*), kaca TCO yang sudah terlapisi TiO₂ di-*sinter* pada temperatur 225°C selama 2 menit menggunakan *hotplate*. Temperatur *hotplate* diturunkan secara perlahan untuk mencegah terjadi *thermal stress* dan terkelupasnya lapisan TiO₂, kemudian kaca TCO dibiarkan pada temperatur ruang.

Untuk pelapisan *bilayer*, lapisan dibawahnya adalah TiO₂ yang lebih besar yakni >20nm (lapisan penghambur cahaya). Kemudian prosesnya sama seperti pelapisan pertama, yakni setelah tahap pelapisan kedua, kaca TCO yang sudah terlapisi TiO₂ di-*sinter* pada temperatur 225°C selama 2 menit dengan

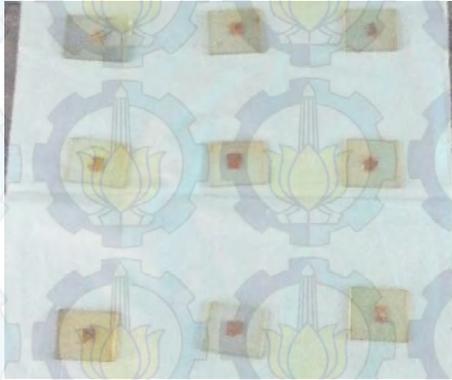
menggunakan *hotplate*. Temperatur *hotplate* diturunkan secara perlahan hingga temperatur ruang.



Gambar 3.6 Pelapisan pasta TiO₂ pada Kaca TCO dengan menggunakan metode *doctor blade* (dilakukan dua kali untuk mendapatkan struktur *bilayer*) [20]

3.6 Perendaman Kaca TCO Berlapis TiO₂ di Larutan Pewarna

Setelah kaca TCO yang berlapis TiO₂ memiliki temperatur yang sama seperti temperatur ruang. Selanjutnya kaca TCO tersebut direndam di dalam larutan pewarna selama 12 jam [20]. Perendaman tersebut bertujuan agar TiO₂ dapat menyerap *dye* dengan baik, sehingga foton yang diserap oleh DSSC semakin banyak dan efisiensi DSSC semakin besar [7]. Gambar 3.7 merupakan hasil perendaman kaca TCO yang sudah dilapisi TiO₂ dan pewarna kulit manggis. Kemudian kaca TCO sudah siap untuk dirakit menjadi DSSC. Jika lapisan TiO₂ tidak mengelupas maka dapat dilanjutkan pada tahap selanjutnya.

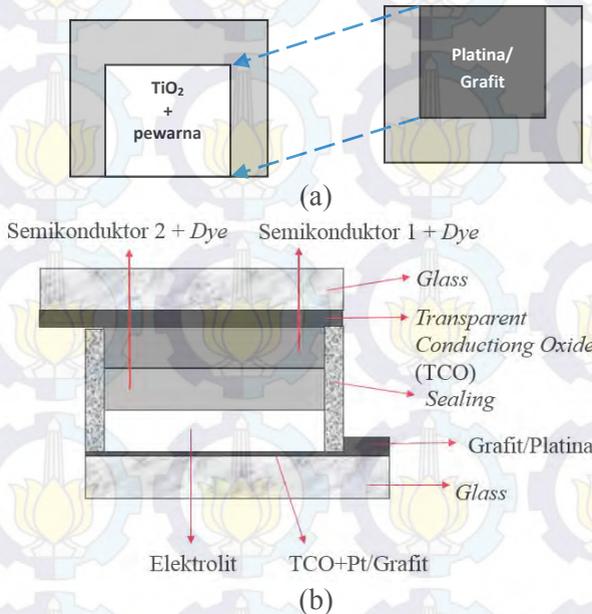


Gambar 3.7 Hasil perendaman kaca TCO berlapis TiO_2 dan pewarna kulit manggis

3.7 Perakitan DSSC

Perakitan DSSC pada penelitian ini menggunakan struktur *sandwich* seperti pada gambar 3.8. Pada struktur tersebut terdapat cairan elektrolit yang berfungsi untuk membantu proses regenerasi siklus DSSC, yaitu mengembalikan elektron *dye* yang sudah tereksitasi agar kembali pada kondisi semula [4].

Cairan elektrolit dibuat dengan dilarutkannya 0,8 gram KI dan 0,127 gram I_2 dalam 10 ml acetonitril. Larutan tersebut diaduk bersama dengan gel yang terbuat dari 7 gram PEG 4000 dan 25 ml kloroform pada temperature 80°C selama satu jam [7]. Sebelum diberi elektrolit, kaca TCO yang sudah dilapisi TiO_2 dan terendam *dye* diberi *scotch tape* pada sisi yang tidak dikenai penjepit untuk mencegah terjadinya rekombinasi dan sebagai ruang untuk elektrolit. Untuk elektroda lawan dibuat dengan TCO yang dilapisi dengan pensil grafit hingga rata. Selanjutnya kaca TCO yang terdapat TiO_2 direkatkan dengan elektroda lawan yang terlapisi grafit dengan menggunakan penjepit (klip kertas). Cairan elektrolit yang sudah dibuat disuntikkan melalui celah di antara kedua kaca TCO tersebut. DSSC yang telah difabrikasi ditunjukkan oleh gambar 3.9.



Gambar 3.8 Perakitan DSSC (a) Penumpukan kaca TCO yang berlapis TiO_2 dan pewarna dengan kaca TCO berlapis grafit/platina (b) Struktur *sandwich* DSSC berstruktur *bilayer* [20]



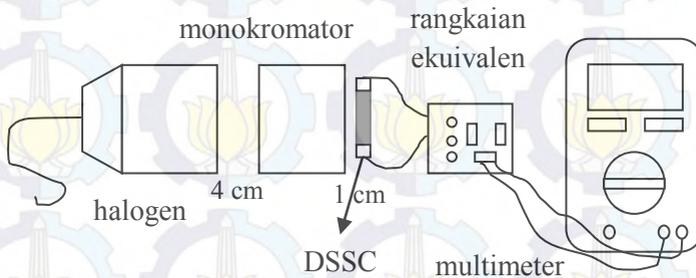
Gambar 3.9 DSSC bersruktur *bilayer* yang telah difabrikasi dengan struktur *sandwich*

3.8 Pengujian Unjuk Kerja DSSC

3.8.1 Pengukuran efisiensi konversi cahaya dengan IPCE

DSSC yang telah difabrikasi kemudian diuji sensitivitasnya terhadap panjang gelombang cahaya tampak dengan menggunakan uji IPCE. Pengujian IPCE dilakukan di laboratorium Fotonika Teknik Fisika ITS. Untuk menghitung besarnya IPCE digunakan persamaan (2.1) [20].

Gambar 3.10 merupakan skema dari alat yang digunakan untuk mengukur IPCE. Untuk melakukan pengukuran IPCE diperlukan monokromator (CT-10T, JASCO) dan lampu halogen (GR-150). Jarak antara lampu halogen ke monokromator adalah 4 cm, sedangkan jarak antara DSSC ke monokromator adalah 1 cm [11]. Pada pengukuran ini digunakan rangkaian ekuivalen seperti pada Gambar 2.5. Daya pada setiap panjang gelombang cahaya lampu halogen diukur menggunakan *Optical Power Meter* (Thorlab S-120C).



Gambar 3.10 Skema pengujian IPCE

3.8.2 Pengukuran arus dan tegangan yang dihasilkan DSSC

Pengukuran arus dan tegangan bertujuan untuk mengetahui bentuk kurva I-V dan efisiensi dari setiap DSSC. Parameter-parameter yang didapatkan dari pengujian arus dan tegangan adalah tegangan rangkaian terbuka (V_{oc}), arus rangkaian pendek (I_{sc}), *fill factor* (FF), arus dan tegangan pada nilai hambatan geser yang berbeda. Gambar 3.11 merupakan proses pengukuran arus dan tegangan dengan mengubah-ubah hambatan luar pada

rangkaian ekuivalen (Gambar 2.5). Alat yang dibutuhkan dalam pengujian arus dan tegangan adalah *Luxmeter* (Mastech MS6612), *pyranometer* (Apogee SP-110), *multimeter* (Sanwa PC500a), dan rangkaian ekuivalen yang telah dibuat pada PCB *Dot Matrix* dengan hambatan geser (VR F637V 2K) rentang 0-2000 Ω .

Pengujian arus dan tegangan dilakukan di lantai 4 Gedung E ITS pada jam 10.00 – 14.00 WIB. Dikarenakan intensitas cahaya matahari yang berubah-ubah disebabkan oleh adanya awan, pengambilan data hanya dilakukan ketika intensitas matahari yang terukur melalui *luxmeter* melebihi 32.000 lux atau 0,02528 W/cm^2 . Hal tersebut dilakukan dengan tujuan agar diperoleh efisiensi yang maksimum. Untuk pengujian arus dan tegangan tiap DSSC, tabel rancangan penelitiannya ditunjukkan oleh tabel 3.2. Luas permukaan (A) setiap DSSC adalah 0,25 cm^2 .

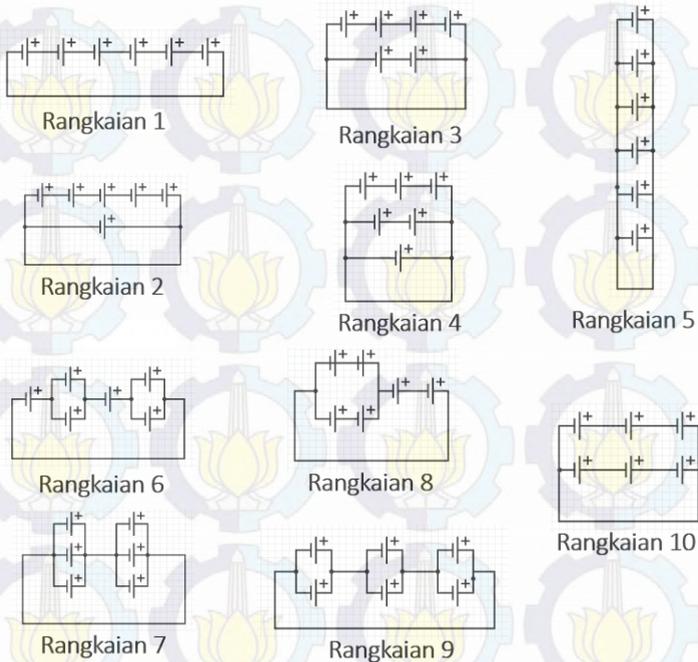


Gambar 3.11 Pengukuran arus dan tegangan di bawah cahaya matahari

3.9 Pengujian Unjuk Kerja Rangkaian

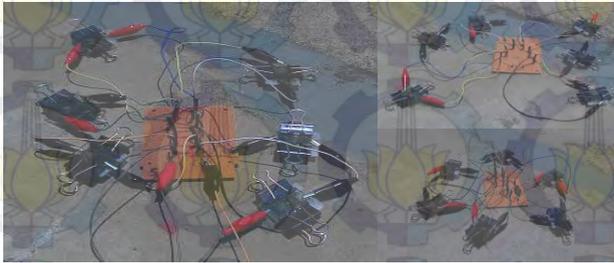
Pengujian unjuk kerja rangkaian menggunakan uji arus tegangan sehingga diperoleh kurva I-V. Pengujian arus dan tegangan rangkaian terdiri dari 10 variasi rangkaian. Sepuluh rangkaian tersebut terdiri dari 6 buah DSSC yang dirangkai secara seri, paralel, dan gabungan keduanya yang ditunjukkan oleh

gambar 3.12. Konfigurasi rangkaian tersebut didasarkan atas konfigurasi yang mungkin terbentuk dari 6 DSSC baik secara seri, paralel, maupun gabungan keduanya. Konfigurasi DSSC merupakan suatu hal yang sangat penting, karena hubungan DSSC satu dengan lainnya pada suatu rangkaian dapat mempengaruhi efisiensi yang dihasilkan [8].



Gambar 3.12 Variasi 10 rangkaian DSSC

Enam buah DSSC dihubungkan satu dengan yang lain menggunakan kabel dan penjepit pada PCB yang telah dibuat. Contoh DSSC yang telah dirangkai dengan suatu konfigurasi tertentu ditunjukkan oleh gambar 3.13. Luas permukaan setiap rangkaian sebesar 1,5 cm².



Gambar 3.13 Pengujian arus dan tegangan rangkaian

3.10 Perhitungan Teoretis dengan Pemodelan Rangkaian Ekuivalen Satu Dioda

Untuk memvalidasi hasil pengujian arus dan tegangan baik pada DSSC maupun pada rangkaian maka dilakukan perhitungan teoretis dengan pemodelan rangkaian ekuivalen satu dioda. Perhitungan teoretis dilakukan untuk mendapatkan kurva I-V yang ideal sehingga dapat dibandingkan dengan hasil pengukuran. Parameter yang dibutuhkan dalam perhitungan teoretis adalah I_{sc} , J_{sc} , dan temperatur pada saat pengujian arus tegangan. Parameter-parameter tersebut dimasukkan pada persamaan (2.12). Besarnya V_{MPP} dihitung berdasarkan persamaan (2.13) dan I_{MPP} dihitung berdasarkan persamaan (2.14).

Persamaan (2.12) digunakan untuk mendapatkan nilai arus yang merupakan fungsi tegangan dan mengabaikan hambatan seri (R_s) serta hambatan paralel (R_{sh}). Nilai tegangan yang dimasukkan adalah nilai tegangan berdasarkan pengukuran menggunakan hambatan geser. Dalam pengukuran arus dan tegangan menggunakan hambatan geser, hambatan seri dan hambatan paralel tidak diabaikan. Namun perubahan hambatan paralel berpengaruh sangat kecil terhadap kurva I-V sehingga biasanya hambatan paralel diabaikan [18]. Untuk menghitung besarnya hambatan seri maka digunakan persamaan (2.15), yakni dengan memasukkan *fill factor* perhitungan teoretis dan *fill factor* perhitungan berdasarkan pengukuran. Nilai hambatan seri yang telah diperoleh dimasukkan dalam persamaan (2.10).

Persamaan (2.10) menjelaskan bahwa nilai arus adalah fungsi tegangan, untuk menghitung nilai arus akibat adanya penambahan hambatan seri maka digunakan metode numerik. Penyelesaian metode numerik menggunakan perangkat lunak Matlab R2009b, kode pemrogramannya dapat dilihat pada lampiran A.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

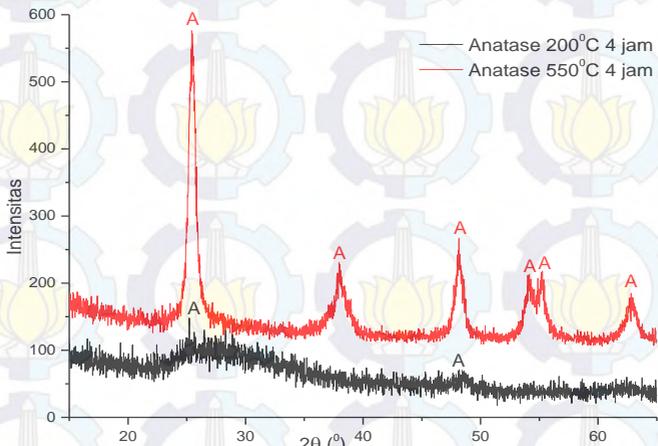


BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini dilakukan analisa dan pembahasan hasil pengujian XRD, unjuk kerja tiap DSSC berstruktur *bilayer*, dan unjuk kerja DSSC berstruktur *bilayer* yang terangkai seri dan paralel serta gabungan keduanya. Analisa XRD meliputi perhitungan ukuran partikel menggunakan persamaan Scherrer dan penggolongan fase yang terbentuk berdasarkan JCPDS, analisa unjuk kerja tiap DSSC dengan uji IPCE dan uji arus-tegangan, sedangkan analisa DSSC yang terangkai seri dan paralel dengan uji arus-tegangan .

4.1 Hasil dan Analisa Pengujian *X-Ray Diffraction* (XRD) TiO_2

Pengujian XRD serbuk TiO_2 bertujuan untuk mengetahui fase TiO_2 yang terbentuk dan ukuran partikel (kristal) TiO_2 . Gambar 4.1 merupakan grafik hasil pengujian XRD serbuk TiO_2 dengan variasi pada waktu dan temperatur kalsinasi. Penggolongan fase TiO_2 didasarkan pada *peak* yang terbentuk pada nilai 2θ , nilai 2θ tersebut dicocokkan dengan JCPDS 21-1272 untuk fase anatase.



Gambar 4.1 Hasil XRD TiO_2

Pada penelitian ini, fase TiO_2 yang diinginkan adalah fase anatase. Hal tersebut didasarkan atas penelitian sebelumnya, DSSC berstruktur *bilayer* memiliki efisiensi terbesar pada *layer* anatase-anatase yakni 0,461% dibandingkan dengan *layer* anatase-rutile yang hanya 0,1365% [7].

Berdasarkan hasil XRD serbuk TiO_2 yang dikalsinasi pada temperatur 550°C selama 4 jam, semua *peak* yang terbentuk pada 2θ adalah fase anatase. Sudut yang memiliki intensitas tertinggi sebesar 476 adalah sudut $25,43^\circ$, sehingga *peak* pada $2\theta=25,43^\circ$ orientasi [101] digunakan sebagai acuan untuk perhitungan ukuran partikel. Sedangkan serbuk TiO_2 yang dikalsinasi pada temperatur 200°C selama 4 jam menunjukkan intensitas yang rendah pada *peak* penanda fase anatase. Hanya 2 *peak* penanda anatase yang teramati, yakni pada sudut $25,49^\circ$ dan $48,85^\circ$. Intensitas tertinggi diantara dua *peak* tersebut sebesar 284 pada $25,49^\circ$, sehingga *peak* pada $2\theta=25,49^\circ$ orientasi [101] digunakan sebagai acuan untuk perhitungan ukuran partikel.

Ukuran partikel dihitung berdasarkan persamaan (3.1). Ukuran partikel yang terbentuk pada temperatur kalsinasi 550°C selama 4 jam sebesar $49,26$ nm (tabel 4.1). TiO_2 yang terbentuk bersifat kristalin dikarenakan tingginya intensitas pada *peak* penanda fasenya. Sedangkan pada temperatur 200°C selama 4 jam, ukuran kristal yang terbentuk sebesar $5,43$ nm (tabel 4.1). TiO_2 yang terbentuk memiliki struktur *amorf*, dikarenakan intensitas pada *peak* penanda fasenya bernilai rendah.

Tabel 4.1 Ukuran Partikel TiO_2

Perlakuan	200°C (4 jam)	550°C (4 jam)
Fase	Anatase	Anatase
FWHM ($^\circ$)	1,52	0,673
2θ ($^\circ$)	25,4918	25,4328
Ukuran Kristal (nm)	5,43	49,26

TiO_2 berukuran $5,43$ nm dipakai pada lapisan *top layer* (lapisan utama) dan yang berukuran $49,26$ nm dipakai pada lapisan *bottom layer* (lapisan penghambur cahaya) pada DSSC

berstruktur *bilayer* anatase-anatase [7]. Jika dibandingkan dengan penelitian sebelumnya [7], besar partikel lapisan utama pada penelitian ini lebih kecil ($5,43 \text{ nm} < 8,23 \text{ nm}$) sehingga secara teoritis banyaknya *dye* yang terserap menjadi semakin banyak. Sedangkan besar partikel lapisan penghambur cahaya pada penelitian ini lebih besar ($49,26 \text{ nm} > 27,2 \text{ nm}$), sehingga secara teoritis jalur cahaya menjadi semakin panjang (intensitas hamburan balik menjadi semakin tinggi). Didasarkan kedua hal tersebut, yakni *dye* yang terserap lebih banyak dan jalur cahaya menjadi semakin panjang maka dibuat hipotesis bahwa efisiensi DSSC yang dihasilkan dari penelitian ini dapat melampaui efisiensi DSSC penelitian sebelumnya [7], yakni melebihi 0,2766%.

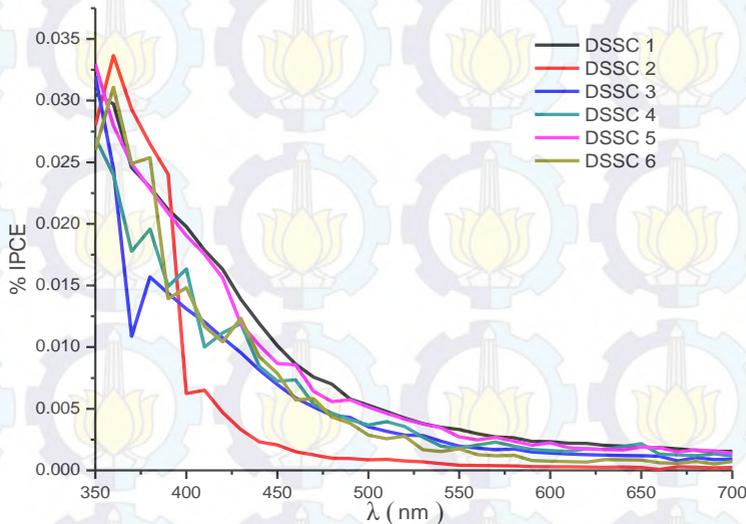
4.2 Hasil dan Analisa Pengujian Unjuk Kerja Setiap DSSC

4.2.1 Pengujian *incident photon to current conversion efficiency* (IPCE)

Pengujian IPCE bertujuan untuk menentukan efisiensi konversi cahaya pada DSSC. Gambar 4.2 merupakan hasil pengujian IPCE DSSC berstruktur *bilayer* anatase TiO_2 dengan pewarna kulit manggis. Enam DSSC yang telah difabrikasi menunjukkan spektrum IPCE yang berbeda-beda. Hal tersebut disebabkan oleh kelemahan metode pelapisan TiO_2 ke kaca TCO yang menggunakan metode *doctor blade*, yakni tidak dapat mengontrol secara presisi ketebalan TiO_2 yang dilapiskan pada kaca TCO. Bervariasinya nilai IPCE disebabkan oleh ketebalan lapisan TiO_2 pada kaca TCO yang berbeda-beda. Ketebalan lapisan TiO_2 pada kaca melalui metode *doctor blade* dikontrol oleh ketebalan *scotch tape*. Ketebalan *scotch tape* mudah berubah akibat adanya pengotor yang menempel atau adanya gelembung udara yang terbentuk pada saat proses penempelan *scotch tape* ke kaca TCO.

Gambar 4.2 menunjukkan nilai IPCE yang tinggi berada pada panjang gelombang cahaya 350-500 nm (nilai IPCE $> 0,005\%$). *Peak* IPCE terbentuk pada DSSC 2 dan DSSC 6 pada panjang gelombang cahaya 350-400 nm. Nilai IPCE tertinggi dari

DSSC berstruktur *bilayer* anatase TiO₂ dengan pewarna kulit manggis adalah 0,02407% di panjang gelombang 370 nm pada DSSC 2.



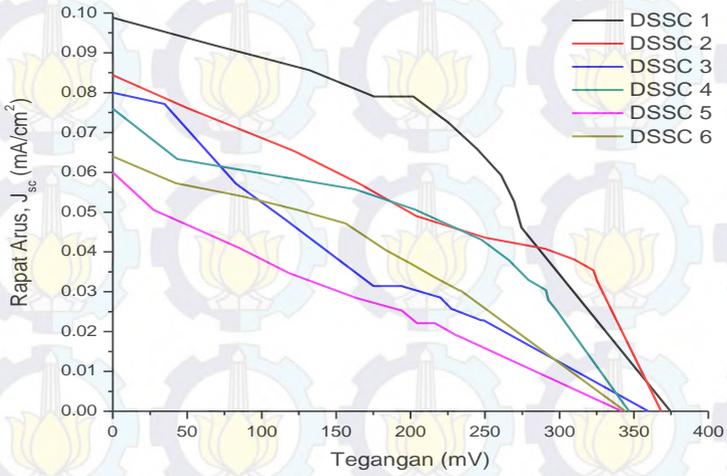
Gambar 4.2 Spektrum IPCE DSSC berstruktur *bilayer* anatase TiO₂

Nilai IPCE yang tinggi pada rentang 350 – 500 nm terjadi karena pewarna kulit manggis mengandung *antosianin* tipe *sianidin*, dimana tipe *antosianin* tersebut memiliki rentang absorbansi pada panjang gelombang cahaya 400-500 nm [9]. Selain itu, tingginya nilai IPCE pada rentang 350 – 500 nm disebabkan oleh pewarna kulit manggis memiliki absorbansi pada panjang gelombang 392,5 nm berdasarkan pengujian UV-Vis [9].

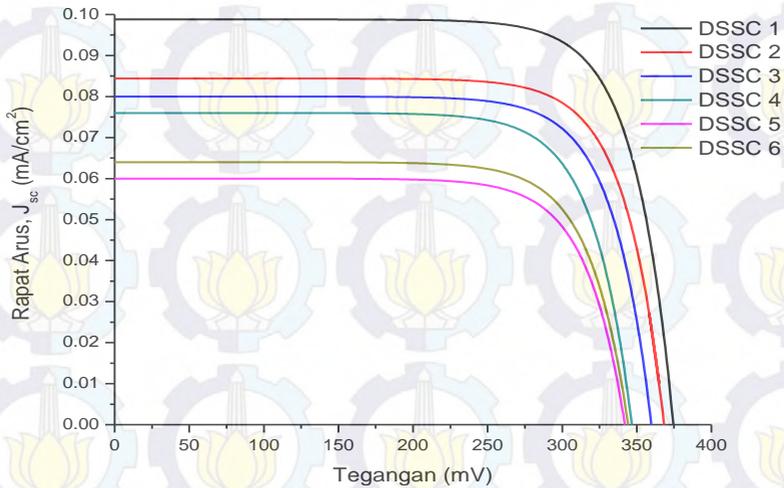
4.2.2 Pengujian arus dan tegangan tiap DSSC

Pengujian arus dan tegangan bertujuan untuk mengetahui kurva I-V dan efisiensi DSSC. Gambar 4.3a adalah kurva I-V yang merupakan hasil pengujian arus-tegangan dari 6 DSSC berstruktur *bilayer* anatase TiO₂. Nilai arus dan tegangan tersebut diperoleh dengan susunan alat seperti gambar 2.5 dengan mengubah nilai hambatan menggunakan hambatan geser (variabel resistor). Apabila diterapkan pemodelan DSSC menggunakan

rangkaian ekuivalen satu dioda, maka kurva I-V nya menjadi kurva I-V ideal seperti gambar 4.3b.



(a)



(b)

Gambar 4.3 Kurva I-V DSSC (a) Pengukuran sebenarnya dengan hambatan geser (b) Perhitungan teoretis dengan $n=1$

Tabel 4.2 Hasil Pengukuran dan Perhitungan J_{sc} , V_{oc} , *Fill Factor*, dan Daya Maksimal (P_{max}) pada Setiap DSSC

Nama DSSC	J_{sc}	V_{oc}	<i>Fill Factor</i> (%)		P_{max} ($mWcm^{-2}$)	
	(mA/c m^2)	(mV)	Pengukuran	Teoretis	Pengukuran	Teoretis
DSSC 1	0,099	374,5	44,05	75,28	4,083	6,978
DSSC 2	0,084	368,3	38,30	75,48	2,962	5,838
DSSC 3	0,080	359,8	21,83	74,65	1,571	5,372
DSSC 4	0,076	346,7	22,21	73,98	1,463	4,873
DSSC 5	0,060	342,0	23,90	73,70	1,226	3,781
DSSC 6	0,064	344,2	25,80	73,78	1,421	4,063

Dari 6 DSSC yang telah difabrikasi, nilai arus (J_{sc}) dan tegangan (V_{oc}) keluarannya berbeda-beda (tabel 4.2). Padahal keenam DSSC melalui proses fabrikasi yang sama, sehingga arus dan tegangan keluarannya diharapkan juga sama. Adanya perbedaan nilai arus dan tegangan pada setiap DSSC disebabkan oleh penggunaan metode pelapisan TiO_2 ke kaca TCO yang menggunakan metode *doctor blade*. Metode *doctor blade* adalah metode yang tidak dapat mengontrol secara presisi ketebalan TiO_2 yang dilapiskan pada kaca TCO. Pada metode *doctor blade*, ketebalan lapisan TiO_2 pada kaca dikontrol oleh ketebalan *scotch tape*. Ketebalan *scotch tape* mudah berubah akibat adanya debu/pengotor yang menempel atau adanya gelembung udara yang terbentuk pada saat proses penempelan *scotch tape* ke kaca TCO. Hal tersebut menyebabkan ketebalan lapisan TiO_2 pada kaca TCO berbeda-beda.

Ketebalan lapisan TiO_2 sangat mempengaruhi efisiensi DSSC, pada penelitian sebelumnya perbedaan ketebalan TiO_2 sebesar $1,0 \mu m$ yang dilapiskan menggunakan metode *spin coating* menyebabkan perbedaan efisiensi DSSC sebesar 1% [23]. Semakin tebal lapisan TiO_2 maka hambatan serinya menjadi semakin besar [18] dan mengakibatkan semakin menurunnya transmitansi lapisan TiO_2 sehingga mengurangi cahaya datang

yang mengenai *dye* [23]. Padahal DSSC berstruktur *bilayer* TiO₂ pada penelitian sebelumnya memiliki ketebalan 74,32 μm [7].

Tabel 4.2 menunjukkan bahwa DSSC 1 memiliki nilai P_{max} yang tertinggi dibandingkan DSSC lainnya baik secara pengukuran dan teoretis ($P_{\text{max_pengukuran}} = 4,083 \times 10^{-6} \text{ W/cm}^2$, $P_{\text{max_teoretis}} = 6,978 \times 10^{-6} \text{ W/cm}^2$), sedangkan DSSC 5 memiliki P_{max} yang terendah ($P_{\text{max_pengukuran}} = 1,226 \times 10^{-6} \text{ W/cm}^2$, $P_{\text{max_teoretis}} = 3,781 \times 10^{-6} \text{ W/cm}^2$). Nilai *fill factor* antara metode pengukuran dan metode teoretis menunjukkan tidak adanya korelasi. Nilai *fill factor* tertinggi secara pengukuran diperoleh pada DSSC 1 sebesar 44,05 % dan terendah pada DSSC 3 sebesar 21,83%, sedangkan tertinggi secara teoretis diperoleh pada DSSC 2 sebesar 75,48% dan terendah pada DSSC 5 sebesar 73,70%. Jika dihubungkan dengan persamaan (2.8), maka nilai daya maksimal (P_{max}) lebih dipengaruhi oleh nilai V_{oc} dan I_{sc} dibandingkan nilai FF.

Perbedaan nilai P_{max} dan *fill factor* antara pengukuran dan teoretis disebabkan oleh adanya hambatan seri (R_s) dan hambatan paralel (R_{sh}) yang tidak diabaikan. Nilai hambatan paralel (R_{sh}) hanya akan berubah menjadi mengecil nilainya ketika dioperasikan dalam kondisi intensitas cahaya yang rendah [16]. Pada penelitian ini, pengambilan data arus dan tegangan hanya dilakukan ketika intensitas cahaya matahari melebihi 32.000 lux, sehingga nilai R_{sh} tidak mengalami perubahan. Selain itu nilai R_{sh} juga berdampak sangat kecil terhadap perubahan kurva I-V (gambar 2.9). Oleh karena itu hambatan yang menyebabkan nilai P_{max} dan *fill factor* antara metode pengukuran dan teoretis berbeda adalah hambatan seri (R_s), nilai R_s lebih dari 0 (tidak diabaikan).

Hambatan seri yang besar dapat menyebabkan menurunnya nilai *fill factor* [17]. Hal tersebut memvalidasi perbedaan *fill factor* pada tabel 4.2, *fill factor* pengukuran lebih kecil dibandingkan *fill factor* teoretis. Perbedaan nilai *fill factor* pada nilai V_{oc} dan I_{sc} yang tetap menyebabkan perbedaan nilai P_{max} . Besarnya R_s dapat dihitung menggunakan persamaan (2.15) yang ditunjukkan oleh tabel 4.3.

Tabel 4.3 Hasil Perhitungan R_s Setiap DSSC

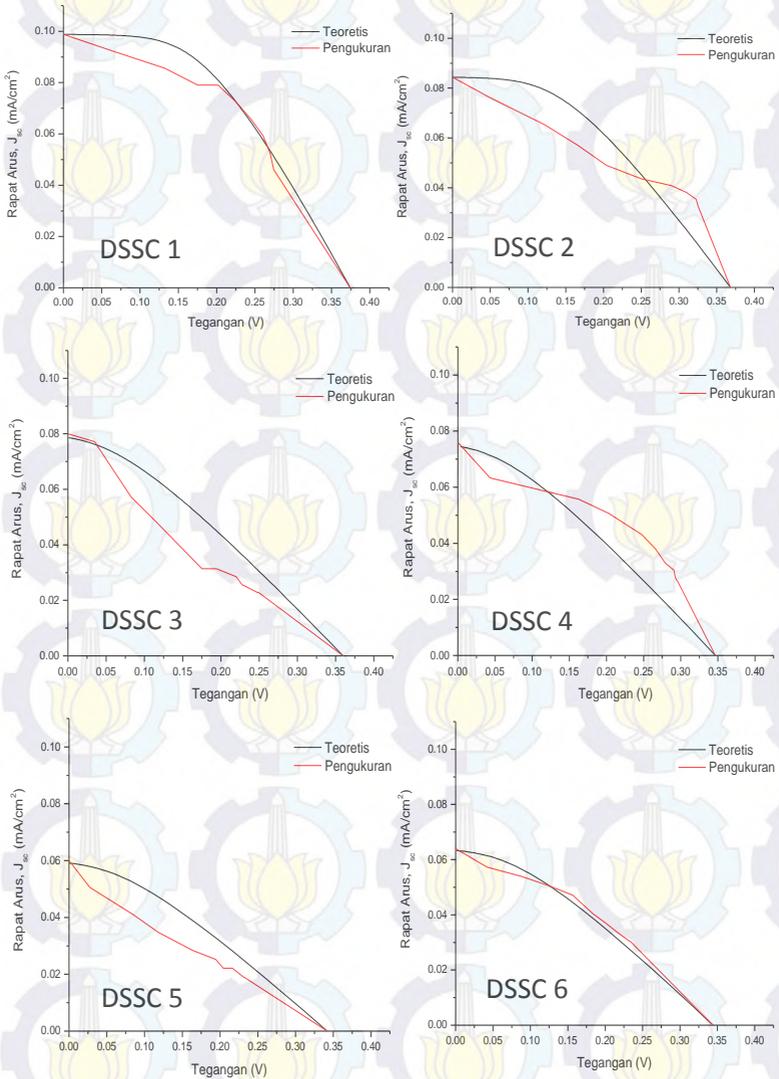
Nama DSSC	I_{sc} (μA)	V_{oc} (V)	R_{CH} (k Ω)	FF ₀ (%)	FF _s (%)	R_s (k Ω)
DSSC 1	25	0,3745	15,13	75,28	44,05	6,28
DSSC 2	21	0,3683	17,54	75,48	38,3	8,64
DSSC 3	20	0,3598	17,99	74,65	21,83	12,73
DSSC 4	19	0,3467	18,25	73,98	22,21	12,77
DSSC 5	15	0,3420	22,80	73,7	23,9	15,41
DSSC 6	16	0,3442	21,51	73,78	25,8	13,99

Tabel 4.3 menunjukkan bahwa nilai R_s yang terbesar terdapat pada DSSC 5 yang merupakan DSSC dengan P_{max} terkecil (tabel 4.2), sedangkan nilai R_s terkecil terdapat pada DSSC 1 yang merupakan DSSC dengan P_{max} terbesar (tabel 4.2). Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa semakin besar R_s maka P_{max} menjadi semakin kecil dan sebaliknya (berbanding terbalik). Hubungan tersebut ditunjukkan oleh persamaan berikut:

$$P'_{max} = P_{max} \left(1 - \frac{R_s}{R_{CH}}\right) \quad (4.1)$$

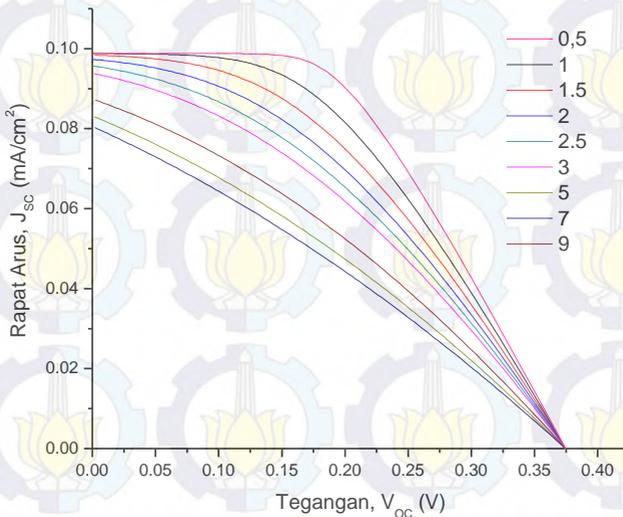
Dimana P_{max} adalah nilai P_{max} sebelum adanya hambatan seri (P_{max} teoretis), P'_{max} adalah nilai P_{max} pengukuran akibat adanya hambatan seri. Apabila nilai R_s yang diperoleh pada tabel 4.3 dimasukkan ke dalam persamaan pemodelan rangkaian ekuivalen satu dioda, yakni persamaan (2.10), maka perbandingan antara kurva I-V teoretis (R_s DSSC) dengan kurva I-V pengukuran (DSSC) ditunjukkan oleh gambar 4.4.

Gambar 4.4 menunjukkan bahwa kurva I-V DSSC yang dimodelkan dengan rangkaian ekuivalen satu dioda dan memiliki nilai hambatan seri (R_s) yang selanjutnya sebut kurva I-V teoretis bersinggungan dengan kurva I-V hasil pengukuran. DSSC yang pola bersinggungannya berhimpit adalah DSSC 1 dan DSSC 6, sedangkan DSSC yang yang pola bersinggungannya renggang adalah DSSC 2, DSSC 3, DSSC 4, dan DSSC 5. Kurva I-V pengukuran berada dibawah kurva I-V teoretis, hal tersebut menunjukkan ada parameter lain yang mempengaruhi kurva I-V selain hambatan seri (R_s), yakni faktor idealitas dioda (n).



Gambar 4.4 Perbandingan kurva I-V teoretis dengan R_s dan kurva I-V pengukuran pada setiap DSSC

Kurva I-V teoretis pada gambar 4.4 menggunakan nilai n sama dengan 1, n adalah faktor idealitas dioda. Faktor idealitas dioda adalah parameter untuk mengukur seberapa dekat dioda pada rangkaian ekuivalen memenuhi persamaan dioda ideal yang ditunjukkan oleh persamaan (2.11). Apabila menggunakan kurva I-V DSSC 1, kemudian nilai n dibuat bervariasi dari rentang 0,5 hingga 9, maka hasilnya ditunjukkan oleh gambar 4.5.



Gambar 4.5 Kurva I-V DSSC 1 dengan nilai n yang bervariasi

Gambar 4.5 menunjukkan bahwa kenaikan nilai n menyebabkan kurva I-V yang dihasilkan menjadi semakin mengecil *fill factor*-nya. *Fill factor* adalah luasan maksimum dari persegi panjang yang dapat dibentuk pada kurva I-V. Kenaikan nilai n juga menyebabkan arus (J_{sc}) menjadi semakin mengecil dan kurva I-V yang dihasilkan berbentuk segitiga, sehingga adanya bentuk segitiga pada kurva I-V gambar 4.3 seperti DSSC 5 disebabkan nilai n yang lebih dari 1.

Terdapat dua macam efisiensi, efisiensi pengukuran dan efisiensi teoretis. Efisiensi pengukuran adalah efisiensi yang diperoleh dari data pengukuran, sedangkan efisiensi teoretis

adalah efisiensi ideal dimana nilai R_s diabaikan dan nilai n adalah 1. Nilai P_{\max} teoretis menggunakan persamaan (2.12) dan persamaan (2.13). Hasil perhitungan efisiensi DSSC menggunakan persamaan (2.9) ditunjukkan oleh tabel 4.4.

Tabel 4.4 Hasil Perhitungan Efisiensi Berdasarkan *Luxmeter* dan *Pyranometer* pada Setiap DSSC

Nama DSSC	<i>Luxmeter</i>			<i>Pyranometer</i>		
	Intensitas (W/cm ²)	Efisiensi (%)		Intensitas (W/cm ²)	Efisiensi (%)	
		Pengukuran	Teoretis		Pengukuran	Teoretis
DSSC 1	0,00682	0,0598	0,1023	0,01250	0,0327	0,0558
DSSC 2	0,00685	0,0432	0,0852	0,01263	0,0235	0,0462
DSSC 3	0,00695	0,0226	0,0773	0,01304	0,0120	0,0412
DSSC 4	0,00698	0,0210	0,0698	0,01318	0,0111	0,0370
DSSC 5	0,00721	0,0170	0,0524	0,01418	0,0087	0,0267
DSSC 6	0,00745	0,0191	0,0546	0,01521	0,0093	0,0267

Tabel 4.4 menunjukkan bahwa efisiensi DSSC yang terbesar baik secara perhitungan menggunakan intensitas *luxmeter* dan *pyranometer* adalah DSSC 1, sedangkan yang terkecil adalah DSSC 5. Hal tersebut berkorelasi dengan besarnya hambatan seri (R_s) setiap DSSC (tabel 4.3), DSSC 1 memiliki nilai R_s terkecil sedangkan DSSC 5 memiliki nilai R_s terbesar. Sehingga semakin besar nilai R_s maka efisiensinya menjadi semakin mengecil. Selain itu, efisiensi dari DSSC berstruktur *bilayer* anatase TiO₂ berada dalam rentang 0,0087% hingga 0,0327%.

Perbedaan nilai efisiensi antara perhitungan menggunakan daya *luxmeter* dan daya *pyranometer* disebabkan oleh intensitas daya cahaya matahari yang diukur oleh setiap alat ukur berbeda (tabel 4.4). Meskipun nilai efisiensi berdasarkan *luxmeter* dan *pyranometer* berbeda, tetapi *trend* grafik efisiensinya hampir sama (lampiran B).

Berdasarkan persamaan perhitungan efisiensi yakni persamaan (2.9), dengan nilai daya maksimal (P_{\max}) DSSC yang

tetap, semakin kecil daya cahaya matahari (P_{cahaya}) maka efisiensinya menjadi semakin besar. Oleh karena itu, efisiensi menggunakan *luxmeter* lebih besar dibandingkan efisiensi menggunakan *pyranometer*. Daya cahaya matahari yang terukur oleh *luxmeter* lebih kecil dikarenakan *luxmeter* mengukur intensitas cahaya matahari pada panjang gelombang 320-730 nm [24] (lampiran D), sedangkan *pyranometer* mengukur intensitas cahaya matahari pada panjang gelombang 360-1120 nm [25] (lampiran E).

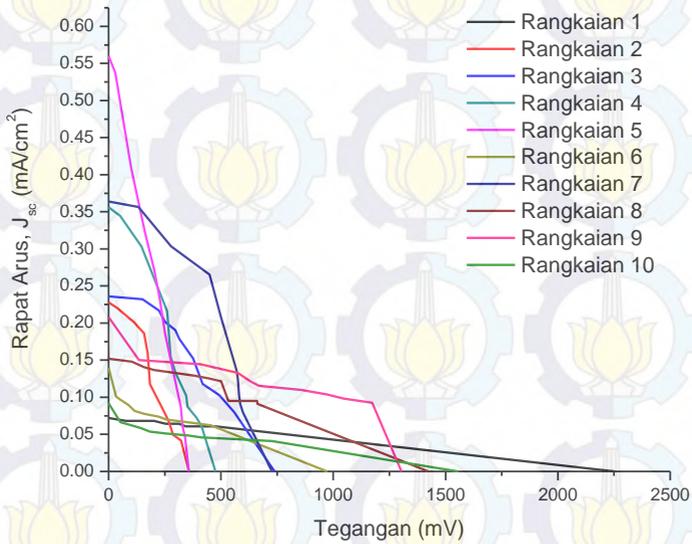
Dikarenakan rentang spektrum panjang gelombang *pyranometer* lebih luas dibandingkan *luxmeter* maka nilai intensitas daya *pyranometer* lebih besar. Intensitas daya *luxmeter* berada dalam rentang $0,00682 \text{ W/cm}^2$ hingga $0,00745 \text{ W/cm}^2$, sedangkan intensitas daya *pyranometer* berada dalam rentang $0,01250 \text{ W/cm}^2$ hingga $0,01521 \text{ W/cm}^2$.

4.3 Hasil dan Analisa Pengujian Unjuk Kerja Rangkaian

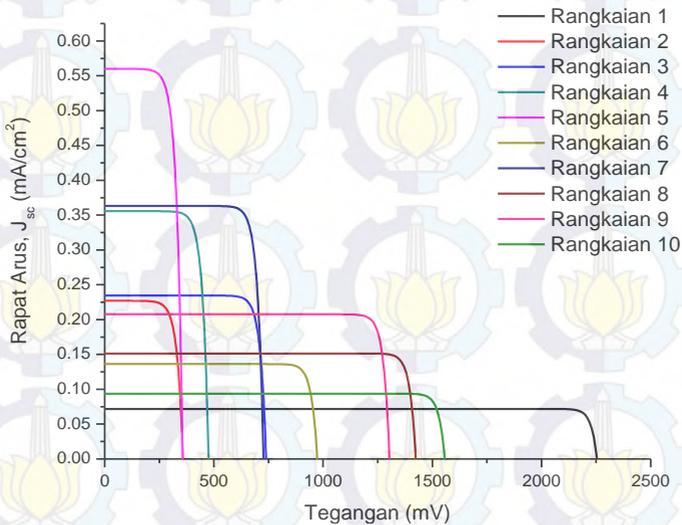
4.3.1 Pengujian arus dan tegangan setiap rangkaian

Gambar 4.6 merupakan kurva I-V hasil pengujian arus dan tegangan dari 10 variasi rangkaian. Rangkaian terdiri dari 6 DSSC yang divariasikan secara seri, paralel, maupun gabungan keduanya seperti gambar 3.12. Kurva I-V yang dihasilkan pada gambar 4.6a merupakan hasil pengukuran arus dan tegangan. Apabila diterapkan pemodelan DSSC dengan rangkaian ekuivalen satu dioda, maka kurva I-V ditunjukkan oleh gambar 4.6b.

Perubahan nilai J_{sc} , V_{oc} , *fill factor*, dan P_{max} dari setiap rangkaian ditunjukkan pada tabel 4.5. Sama seperti pengukuran arus dan tegangan pada setiap DSSC, nilai P_{max} dan *fill factor* antara metode pengukuran dan teoretis berbeda pada setiap rangkaian. Hal tersebut disebabkan oleh hambatan seri (R_s) yang bernilai lebih dari 0 (tidak diabaikan). Hambatan seri yang besar dapat menyebabkan menurunnya nilai *fill factor* [17]. Hal tersebut memvalidasi perbedaan *fill factor* antara pengukuran dan teoretis pada tabel 4.5, *fill factor* pengukuran lebih kecil dibandingkan *fill factor* teoretis.



(a)



(b)

Gambar 4.6 Kurva I-V rangkaian (a) Pengukuran sebenarnya dengan hambatan geser (b) Teoretis rangkaian ekuivalen satu dioda

Tabel 4.5 Hasil Pengukuran dan Perhitungan J_{sc} , V_{oc} , *fill factor*, dan P_{max} Pada Setiap Rangkaian

Nama DSSC	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{oc} (mV)	<i>Fill Factor</i>		P_{max} (mWcm ⁻²)	
			Pengukuran	Teoretis	Pengukuran	Teoretis
Rang. 1	0,072	2254	34,56	93,67	14,02	37,95
Rang. 2	0,227	358,34	35,99	74,82	7,35	15,22
Rang. 3	0,235	739,17	32,83	84,94	14,32	36,82
Rang. 4	0,356	475,28	33,25	79,20	13,82	33,47
Rang. 5	0,560	356,59	27,68	74,64	14,07	37,26
Rang. 6	0,136	973,32	20,77	87,62	7,08	29,04
Rang. 7	0,363	726,93	45,12	84,55	27,11	55,81
Rang. 8	0,151	1424	29,00	90,76	15,69	48,90
Rang. 9	0,208	1304	39,98	90,12	29,85	61,00
Rang. 10	0,094	1557	20,77	91,39	7,44	33,35

Nilai R_s setiap rangkaian dapat dihitung berdasarkan persamaan (2.15) yang ditunjukkan oleh tabel 4.6. Nilai R_s setiap DSSC berdasarkan pengukuran arus tegangan berada dalam rentang 6,28 k Ω hingga 15,41 k Ω (tabel 4.3), sehingga apabila 6 DSSC tersebut dirangkai dalam rangkaian seri, paralel, atau gabungan, maka nilai R_s rangkaian seharusnya merupakan kelipatan dari nilai R_s setiap DSSC. Idealnya nilai R_s memenuhi persamaan (4.2) untuk DSSC yang dirangkai seri dan persamaan (4.3) untuk DSSC yang dirangkai paralel. Apabila rangkaian merupakan gabungan seri dan paralel maka dapat menggunakan kombinasi persamaan (4.2) dan persamaan (4.3).

$$R_{seri_total} = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6 \quad (4.2)$$

$$R_{paralel_total} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_6} \quad (4.3)$$

Tabel 4.6 Hasil Perhitungan R_s Setiap Rangkaian

Nama Rangkaian	I_{sc} (μA)	V_{oc} (V)	R_{ch} ($k\Omega$)	FF_0 (%)	FF_s (%)	R_s ($k\Omega$)
Rang. 1	18	2,254	125,22	93,67	34,56	79,02
Rang. 2	56,8	0,3583	6,31	74,82	35,99	3,28
Rang. 3	58,8	0,7392	12,58	84,94	32,83	7,72
Rang. 4	89	0,4753	5,34	79,2	33,25	3,10
Rang. 5	140	0,3566	2,55	74,64	27,68	1,60
Rang. 6	34	0,9733	28,63	87,62	20,77	21,84
Rang. 7	91	0,7269	8,01	84,55	45,12	3,74
Rang. 8	38	1,424	37,72	90,76	29	25,67
Rang. 9	52	1,304	25,08	90,12	39,98	13,95
Rang. 10	24	1,557	66,26	91,39	20,77	51,20

Dengan mengasumsikan R_s setiap DSSC pada rangkaian bernilai sama, maka berdasarkan persamaan (4.2) menggunakan rangkaian 1 yang murni seri diperoleh nilai R_s setiap DSSC sebesar 13,17 $k\Omega$, nilai tersebut berada dalam rentang nilai R_s pengukuran arus dan tegangan setiap DSSC yakni 6,277 $k\Omega$ hingga 15,41 $k\Omega$. Apabila menggunakan rangkaian 5 yang murni paralel, berdasarkan persamaan (4.3) diperoleh nilai R_s setiap DSSC sebesar 9,6 $k\Omega$, nilai tersebut juga berada dalam rentang 6,277 $k\Omega$ hingga 15,41 $k\Omega$. Dari hasil perhitungan tersebut dapat ditarik kesimpulan bahwa persamaan (4.2) dan persamaan (4.3) terbukti, nilai R_s setiap rangkaian adalah kelipatan dari nilai R_s setiap DSSC berdasarkan persamaan (4.2), persamaan (4.3), atau gabungan keduanya.

Perhitungan efisiensi setiap rangkaian menggunakan persamaan (2.9) dengan luas permukaan rangkaian sebesar 1,5 cm^2 . Hasil perhitungan efisiensi ditunjukkan oleh tabel 4.7. Tabel 4.7 menunjukkan bahwa efisiensi terbesar baik menggunakan *luxmeter* dan *pyranometer* diperoleh pada rangkaian 9, sedangkan efisiensi terkecil diperoleh pada rangkaian 2. Rangkaian 9 adalah DSSC yang setiap 2 selnya disusun paralel kemudian diseri menjadi satu, sedangkan rangkaian 2 adalah 5 DSSC yang disusun seri dan diparalel dengan 1 DSSC.

Tabel 4.7 Hasil Perhitungan Efisiensi Berdasarkan *Luxmeter* dan *Pyranometer* pada Setiap Rangkaian

Nama DSSC	<i>Luxmeter</i>			<i>Pyranometer</i>		
	Intensitas (W/cm ²)	Efisiensi (%)		Intensitas (W/cm ²)	Efisiensi (%)	
		Pengukuran	Teoretis		Pengukuran	Teoretis
Rang. 1	0,0396	0,0354	0,0958	0,0752	0,0187	0,0505
Rang. 2	0,0400	0,0184	0,0380	0,0770	0,0095	0,0198
Rang. 3	0,0403	0,0356	0,0914	0,0783	0,0183	0,0471
Rang. 4	0,0407	0,0340	0,0823	0,0801	0,0173	0,0418
Rang. 5	0,0408	0,0344	0,0912	0,0809	0,0174	0,0460
Rang. 6	0,0417	0,0170	0,0697	0,0850	0,0083	0,0342
Rang. 7	0,0412	0,0658	0,1356	0,0825	0,0328	0,0676
Rang. 8	0,0410	0,0382	0,1192	0,0819	0,0192	0,0597
Rang. 9	0,0409	0,0729	0,1490	0,0814	0,0366	0,0749
Rang. 10	0,0408	0,0184	0,0818	0,0806	0,0174	0,0414

Perbedaan nilai efisiensi antara perhitungan menggunakan intensitas matahari yang berasal dari *luxmeter* dan *pyranometer* disebabkan oleh intensitas cahaya matahari yang diukur oleh setiap alat ukur berbeda (tabel 4.7). Intensitas *luxmeter* berada dalam rentang 0,0396 W/cm² hingga 0,0417 W/cm², sedangkan intensitas *pyranometer* berada dalam rentang 0,0752 W/cm² hingga 0,0850 W/cm². Meskipun nilai efisiensi berdasarkan *luxmeter* dan *pyranometer* berbeda, tetapi *trend* grafik efisiensinya hampir sama (lampiran C).

Melalui tabel 4.6, dapat diketahui faktor pengali arus dan tegangan pada setiap rangkaian. Rangkaian 1 adalah rangkaian yang berfungsi sebagai standar acuan dalam pengali arus, karena pada rangkaian 1 arus yang dihasilkan paling kecil ($J_{sc} = 0,086$ mA/cm²). Selain itu rangkaian 1 adalah rangkaian seri, arus yang dihasilkan dari rangkaian seri adalah sama pada setiap titiknya. Sedangkan untuk acuan dalam pengali tegangan adalah rangkaian 5, karena pada rangkaian 5 tegangan yang dihasilkan paling kecil ($V_{oc} = 393$ mV). Selain itu rangkaian 5 adalah rangkaian paralel, tegangan yang dihasilkan dari rangkaian paralel adalah sama pada

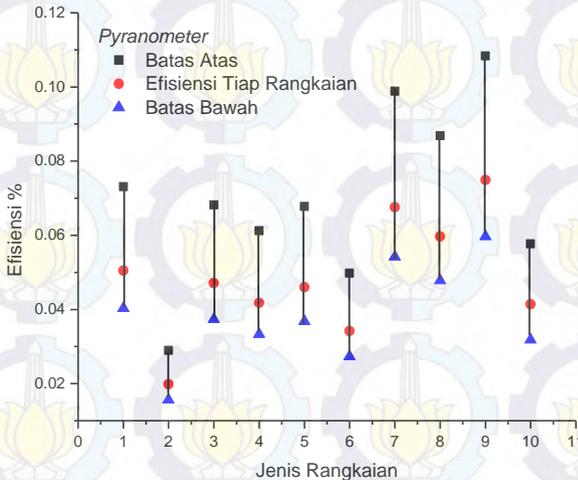
setiap titiknya. Faktor pengali arus dan tegangan tersebut ditunjukkan pada tabel 4.8.

Tabel 4.8 Faktor Pengali Arus dan Tegangan Pada Setiap Rangkaian (tanda * menunjukkan standar acuan/pembagi)

Nama Rangkaian	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{oc} (mV)	Faktor Pengali Arus	Faktor Pengali Tegangan
Rangkaian 1	0,072*	2254	1,00	6,32
Rangkaian 2	0,227	358,34	3,16	1,00
Rangkaian 3	0,235	739,17	3,26	2,07
Rangkaian 4	0,356	475,28	4,95	1,33
Rangkaian 5	0,560	356,59*	7,79	1,00
Rangkaian 6	0,136	973,32	1,89	2,73
Rangkaian 7	0,363	726,93	5,05	2,04
Rangkaian 8	0,151	1424	2,11	3,99
Rangkaian 9	0,208	1304	2,89	3,66
Rangkaian 10	0,094	1557	1,30	4,37

Menggunakan nilai faktor pengali arus dan tegangan, maka dapat dihitung efisiensi maksimum dan efisiensi minimum dari setiap rangkaian. Efisiensi maksimum diperoleh menggunakan DSSC yang memiliki efisiensi tertinggi berdasarkan pengujian arus tegangan tiap DSSC yakni DSSC 1 ($J_{sc}= 0,099$ mA/cm², $V_{oc}=374,5$ mV), sedangkan efisiensi minimum diperoleh menggunakan DSSC yang memiliki efisiensi terendah yakni DSSC 5 ($J_{sc}= 0,060$ mA/cm², $V_{oc}=342,0$ mV). Arus dan tegangan DSSC dengan efisiensi tertinggi tersebut dikalikan dengan faktor pengali arus dan tegangan untuk mendapatkan parameter tiap rangkaian, kemudian dimasukkan kedalam persamaan pemodelan ekuivalen 1 dioda yakni persamaan (2.12). Hal tersebut dilakukan pula pada arus dan tegangan DSSC dengan efisiensi terendah. Hasil perhitungan efisiensi tertinggi dan efisiensi terendah tiap rangkaian yang digabungkan dengan efisiensi sebenarnya dari

rangkaian ditunjukkan oleh gambar 4.7. Nilai efisiensi tersebut menggunakan P_{cahaya} dari *pyranometer*.



Gambar 4.7 Perbandingan efisiensi tertinggi, terendah, dan sebenarnya dari setiap rangkaian

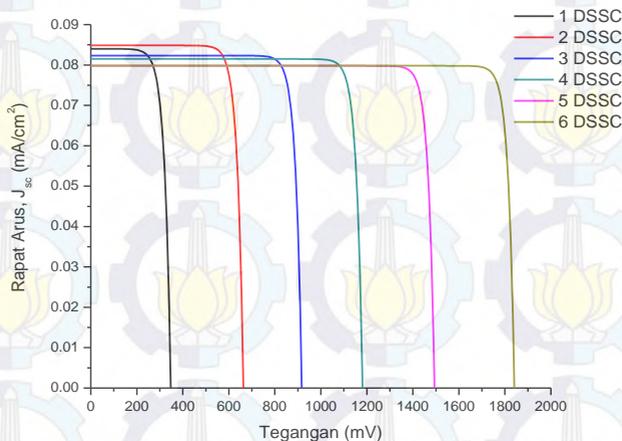
Gambar 4.7 menunjukkan bahwa rangkaian yang memiliki efisiensi rendah baik melalui *luxmeter* dan *pyranometer* adalah rangkaian 2, rangkaian 4, dan rangkaian 6. Rendahnya efisiensi tersebut didasarkan pada perbandingan terhadap efisiensi rangkaian 1 yang murni seri dan rangkaian 5 yang murni paralel. Efisiensi yang rendah disebabkan oleh susunan DSSC yang tidak simetris. Sebagai contoh adalah pada rangkaian 2 (gambar 3.12), terdapat dua jalur pada rangkaian 2, jalur 1 yang terdiri dari 5 DSSC dan jalur 2 terdiri dari 1 DSSC. Jalur 1 yang memiliki 5 DSSC memberikan arusnya pada jalur 2 yang hanya memiliki 1 DSSC agar terjadi kesetimbangan arus, karena pada rangkaian paralel arus tiap jalurnya haruslah sama. Akibat dari kesetimbangan tersebut, arus dan tegangan yang terukur pada multimeter akan berkurang. Begitu pula pada rangkaian 4 dan rangkaian 6.

Pada metode pengukuran menggunakan hambatan geser, efisiensi rangkaian seri ($\eta_{\text{luxmeter}} = 0,0354\%$, $\eta_{\text{pyranometer}} = 0,0187\%$) lebih besar dibandingkan efisiensi rangkaian paralel ($\eta_{\text{luxmeter}} = 0,0344\%$, $\eta_{\text{pyranometer}} = 0,0174\%$), hal ini disebabkan *fill factor* rangkaian seri lebih besar dibandingkan rangkaian paralel. Hal ini memvalidasi penelitian sebelumnya [8], efisiensi rangkaian seri pada penelitian tersebut ($\eta = 0,1619\%$) juga lebih besar dibandingkan efisiensi rangkaian paralel ($\eta = 0,1325\%$).

Efisiensi rangkaian yang terbesar berdasarkan metode pengukuran menggunakan *pyranometer* adalah rangkaian 9 dengan nilai efisiensi 0,0366%. Jika dibandingkan dengan efisiensi terbesar DSSC berdasarkan metode pengukuran menggunakan *pyranometer* yakni DSSC 1 dengan nilai efisiensi 0,0327%, maka rasio efisiensinya sebesar 1,22. Makna dari rasio efisiensi tersebut adalah efisiensi dapat dinaikkan menjadi 1,22 kalinya dengan merangkai 6 DSSC menjadi rangkaian 9.

4.3.2 Pengujian arus dan tegangan rangkaian seri

Gambar 4.8 merupakan grafik I-V rangkaian seri dengan metode pengukuran yang digabung dengan pemodelan rangkaian ekuivalen satu dioda.



Gambar 4.8 Kurva I-V DSSC terangkai seri

Rangkaian seri tersebut dimulai dari 1 DSSC, kemudian ditambah 1 DSSC yang dirangkai secara seri, hingga terangkai 6 DSSC secara seri. Dari kurva I-V pada gambar 4.8, nilai arus menurun seiring bertambahnya DSSC, sedangkan sebaliknya nilai tegangan bertambah. Penurunan arus disebabkan adanya ketidakcocokan arus (*mismatch in short circuit current*) [26]. Ketidakcocokan arus disebabkan arus yang dihasilkan oleh tiap DSSC berbeda-beda (tabel 4.3). Perbedaan arus yang dihasilkan oleh setiap DSSC menyebabkan nilai total arus dari rangkaian mendekati arus DSSC yang memiliki nilai terendah. Hasil plot rapat arus ditunjukkan oleh gambar 4.9a dan hasil plot tegangan ditunjukkan oleh gambar 4.9b.

Dari gambar 4.8 dapat disimpulkan bahwa rangkaian seri adalah rangkaian pengali tegangan. Penambahan setiap sel menyebabkan nilai tegangan menjadi tegangan DSSC awal ditambah dengan tegangan DSSC tambahan (gambar 4.9a), sedangkan nilai arus mengikuti nilai arus terendah dari DSSC (gambar 4.9b). Secara matematis hal tersebut dapat dirumuskan menjadi:

$$V_{seri} = V_1 + V_2 + \dots + V_n \quad (4.4)$$

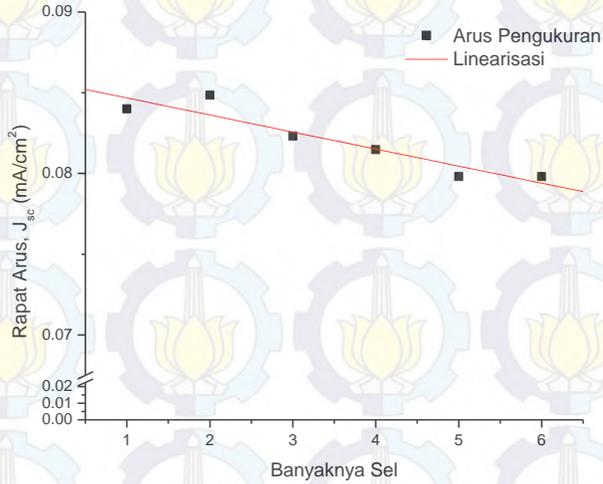
$$I_{seri} = I_1 = I_2 = \dots = I_n \quad (4.5)$$

Penambahan tegangan pada rangkaian seri berdasarkan gambar 4.9b memenuhi persamaan:

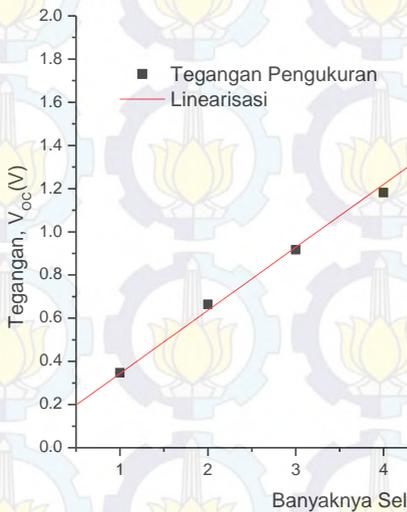
$$V(n) = 0,2921n_s + 0.0516 \quad (4.6)$$

dengan n_s adalah banyaknya DSSC yang terangkai seri dan V adalah V_{oc} rangkaian (Volt).

Ketidacocokan arus rangkaian pendek (*mismatch in short circuit current*) menyebabkan nilai total arus dari rangkaian mendekati arus DSSC yang memiliki nilai terendah [26]. Untuk menghitung arus kombinasi akibat adanya ketidakcocokan arus dilakukan pencerminan kurva I-V DSSC tambahan terhadap sumbu rapat arus.



(a)

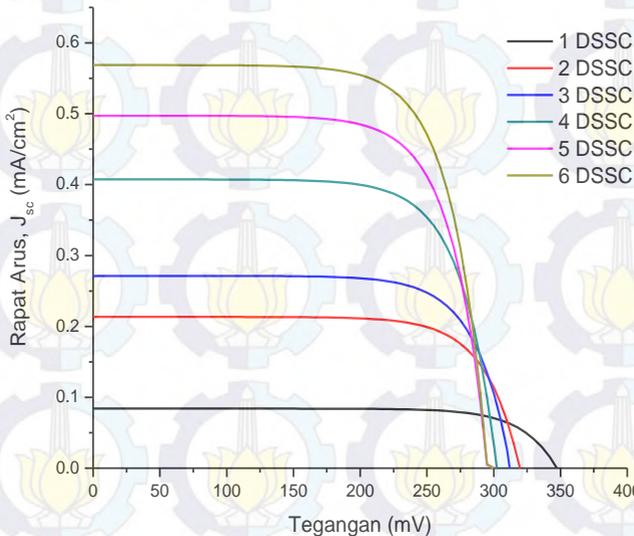


(b)

Gambar 4.9 Arus dan tegangan rangkaian seri (a) Rapat arus (J_{sc}) rangkaian seri (b) Tegangan (V_{oc}) rangkaian seri

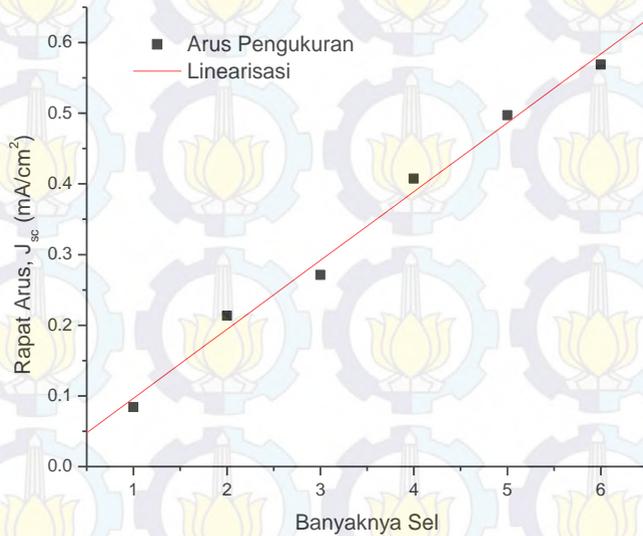
4.3.3 Pengujian arus dan tegangan rangkaian paralel

Gambar 4.10 merupakan kurva I-V rangkaian paralel dengan metode pengukuran yang digabung dengan pemodelan rangkaian ekuivalen satu dioda. Rangkaian paralel tersebut dimulai dari 1 DSSC, kemudian ditambah 1 DSSC yang dirangkai secara paralel, hingga terangkai 6 DSSC secara paralel.

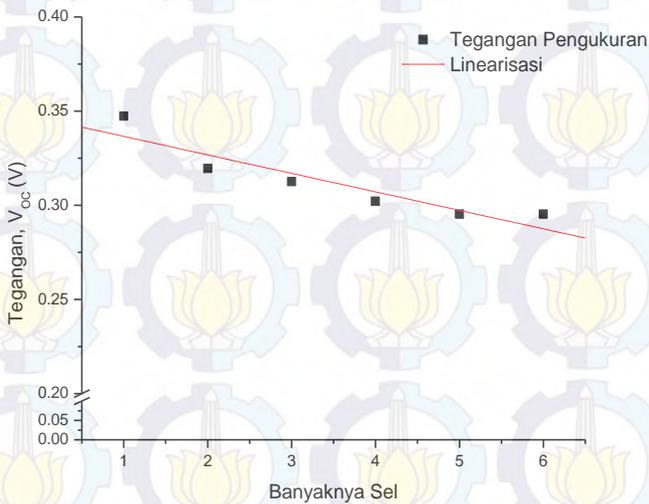


Gambar 4.10 Kurva I-V DSSC terangkai paralel

Gambar 4.10 menunjukkan bahwa nilai arus bertambah seiring bertambahnya DSSC yang dirangkai paralel sedangkan nilai tegangan semakin menurun. Penurunan tegangan disebabkan adanya ketidakcocokan tegangan (*mismatch in open circuit voltage*) [27]. Ketidakcocokan tegangan tersebut disebabkan tegangan yang dihasilkan oleh tiap DSSC berbeda-beda (tabel 4.3). Perbedaan tegangan yang dihasilkan dari setiap DSSC menyebabkan nilai total tegangan dari rangkaian mendekati tegangan DSSC yang memiliki nilai terendah.



(a)



(b)

Gambar 4.11 Arus dan tegangan rangkaian paralel (a) Rapat arus (J_{sc}) rangkaian paralel (b) Tegangan (V_{oc}) rangkaian paralel

Dari gambar 4.10 dapat disimpulkan bahwa rangkaian paralel adalah rangkaian pengali arus. Penambahan setiap sel menyebabkan nilai arus menjadi arus DSSC awal ditambah dengan arus DSSC tambahan, sedangkan nilai tegangan cenderung menurun. Hasil plot rapat arus ditunjukkan oleh gambar 4.11a dan hasil plot tegangan oleh gambar 4.11b. Secara matematis hal tersebut dapat dirumuskan menjadi:

$$I_{paralel} = I_1 + I_2 + \dots + I_n \quad (4.7)$$

$$V_{paralel} = V_1 = V_2 = \dots = V_n \quad (4.8)$$

Penambahan arus pada rangkaian paralel berdasarkan gambar 4.11a memenuhi persamaan:

$$I(n) = 0,0975n_p - 0.0008 \quad (4.9)$$

dengan n_p adalah banyaknya DSSC yang terangkai paralel dan I adalah J_{sc} rangkaian (mA/cm^2).

Ketidacocokan tegangan rangkaian terbuka (*mismatch in open circuit voltage*) menyebabkan nilai total tegangan dari rangkaian mendekati tegangan DSSC yang memiliki nilai terendah [27]. Untuk menghitung tegangan kombinasi akibat adanya ketidakcocokan tegangan, dilakukan pencerminan kurva I-V DSSC tambahan terhadap sumbu tegangan.

4.4 Pembahasan

Efisiensi terbesar dari DSSC yang dihasilkan pada penelitian ini adalah 0,0327%. Nilai efisiensi tersebut didasarkan pada metode pengukuran menggunakan hambatan geser dan P_{cahaya} diukur dari *pyranometer*. Jika dibandingkan dengan penelitian sebelumnya, Wahyuono (2013) $\eta = 0,02196\%$ [7], Agustini (2013) $\eta = 0,0222\%$ [9] maka nilai efisiensi pada penelitian ini lebih besar ($0,0327\% > 0,0222\% > 0,02196\%$). Nilai efisiensi yang lebih besar disebabkan oleh struktur *bilayer* anatase TiO_2 . Struktur *bilayer* menyebabkan terbentuknya *light scattering layer* (Gambar 2.2). Lapisan paling atas atau lapisan utama adalah lapisan TiO_2 dengan ukuran nanopartikel untuk meningkatkan luas permukaan penyerapan *dye*, sedangkan lapisan dibawahnya dengan ukuran submikrometer/nanopartikel yang lebih besar berfungsi sebagai *light scattering layer* (lapisan penghambur

cahaya). *Light scattering layer* mampu menghamburkan kembali cahaya sehingga cahaya yang diserap menjadi semakin banyak dan jalur cahayanya menjadi semakin panjang [7].

Berdasarkan efisiensi DSSC berstruktur *bilayer* pada penelitian sebelumnya [7], maka efisiensi DSSC berstruktur *bilayer* pada penelitian ini jauh lebih kecil ($0,0327\% < 0,2766\%$). Ukuran partikel lapisan utama yang lebih kecil dan ukuran partikel penghambur yang lebih besar tidak menyebabkan nilai efisiensi menjadi lebih besar. Hal ini menandakan bahwa terdapat nilai optimum untuk ukuran partikel baik pada lapisan utama maupun pada lapisan penghambur. Selain itu perbandingan ukuran partikel penghambur terhadap partikel utama pada penelitian sebelumnya [7] lebih kecil yakni $3,3 \left(\frac{27,2 \text{ nm}}{8,23 \text{ nm}} \right)$, sedangkan pada penelitian ini perbandingannya adalah $9,07 \left(\frac{49,26 \text{ nm}}{5,43 \text{ nm}} \right)$. Perbandingan ukuran partikel penghambur terhadap partikel utama yang besar menyebabkan perbedaan pita celah menjadi semakin besar. Semakin kecil ukuran partikel maka pita celahnya menjadi kecil dan sebaliknya [28]. Perbedaan pita celah yang lebar antara pita celah partikel TiO_2 pada lapisan utama dan pita partikel TiO_2 pada lapisan penghambur menyebabkan elektron yang dieksitasi oleh *dye* diinjeksikan pada pita celah yang terkecil. Energi pita celah yang kecil menyebabkan proses rekombinasi menjadi lebih mudah terjadi. Proses rekombinasi menyebabkan arus dan tegangan keluaran DSSC menjadi rendah [29].

Untuk efisiensi DSSC yang dirangkai seri dan paralel, rangkaian yang memiliki efisiensi rendah adalah rangkaian 2, rangkaian 4, dan rangkaian 6. Efisiensi yang rendah tersebut disebabkan oleh susunan DSSC yang tidak simetris. Konfigurasi DSSC yang tidak simetris pada suatu rangkaian menyebabkan nilai arus dan tegangan pada setiap titik rangkaiannya berbeda, sehingga dapat terjadi ketidakcocokan arus dan ketidakcocokan tegangan. Selain DSSC yang disusun tidak simetris, perbedaan arus dan tegangan keluaran dari setiap DSSC yang dirangkai dalam suatu konfigurasi tertentu juga mengakibatkan

ketidakcocokan arus dan ketidakcocokan tegangan. Adanya ketidakcocokan menyebabkan nilai tegangan atau arus rangkaian mengikuti nilai tegangan atau arus DSSC yang terendah.

Rangkaian yang memiliki efisiensi terbesar merupakan rangkaian DSSC yang disusun secara gabungan seri dan paralel, seperti rangkaian 7 dan rangkaian 9. Rangkaian 7 dan rangkaian 9 memiliki efisiensi terbesar yang disebabkan oleh rangkain paralel dapat memperkecil ketidakcocokan arus dan rangkaian seri dapat memperkecil ketidakcocokan tegangan. Rangkaian 7 adalah rangkaian yang setiap 3 DSSC disusun paralel kemudian diseri menjadi satu, sedangkan rangkaian 9 adalah rangkaian yang setiap 2 sel diparalel kemudian diseri menjadi satu (gambar 3.12). Kombinasi rangkaian seri dan paralel yang simetris dapat memperkecil ketidakcocokan arus maupun ketidakcocokan tegangan.

BAB V KESIMPULAN

Pada tugas akhir ini telah berhasil diteliti mengenai fabrikasi *dye-sensitized solar cell* (DSSC) berstruktur *bilayer* anatase TiO₂ dalam rangkaian seri dan paralel dengan hasil sebagai berikut:

- Ukuran partikel TiO₂ fase anatase yang dihasilkan melalui metode kopresipitasi adalah 5,43 nm untuk lapisan utama dan 49,26 nm untuk lapisan penghambur cahaya.
- Efisiensi DSSC yang dihasilkan berdasarkan uji arus-tegangan berada dalam rentang 0,0087% hingga 0,0327%.
- Efisiensi terbaik pada variasi rangkaian seri, paralel, dan campuran 6 DSSC adalah rangkaian 9 yakni setiap 2 sel diparalel kemudian diseri menjadi satu sebesar 0,0366%.
- DSSC yang dikonfigurasi secara simetris menunjukkan nilai efisiensi lebih tinggi dibandingkan DSSC yang dikonfigurasi secara asimetris.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Grätzel, M. 2003. “Review Dye-sensitized Solar Cells”. **Journal of Photochemistry and Photobiology**, pp. 145-153.
- [2] Lee, J K. Yang, M. 2011. “Progress in Light Harvesting and Charge Injection of Dye Sensitized Solar Cells”. **Materials Science and Engineering**. Volume B 176, pp. 1142–1160.
- [3] Kawahara, T. Konishi, Y. Tada, H. Tohge, N. Nishii, J. Ito, S. 2002. “A Patterned TiO₂(Anatase)/TiO₂(Rutile) Bilayer-Type Photocatalyst: Effect of the Anatase/Rutile Junction on the Photocatalytic Activity”. **Angewandte Chemie International Edition**. Volume 41, issue 15, pp. 2811–2813.
- [4] Narayan, M R. 2011. “Dye Sensitized Solar Cells Based on Natural Photosensitizers”. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. Volume 16, issue 1, pp. 208-215.
- [5] Wang, Z S. Kawauchi, H. Kashima, T. Arakawa, H. 2004. “Significant influence of TiO₂ photoelectrode morphology on the energy conversion efficiency of N719 dye-sensitized solar cell”. **Coordination Chemistry Reviews**. Volume 248, pp. 1381–1389.
- [6] Usami, A. 1998. “Theoretical study of charge transportation in dye-sensitized nanocrystalline TiO₂ electrodes”. **Chemical Physics Letters**. Volume 292, issues 1–2, pp. 223–228.
- [7] Wahyuono, R A. Risanti, D D. 2013. “Quasi-solid State DSSC Performance Enhancement by Bilayer Mesoporous TiO₂ Structure Modification”. **Advanced Materials Research**. Volume 789, pp. 93-96.
- [8] Ramadhani, K. 2009. “Pengaruh hubungan seri-paralel pada rangkaian sel surya pewarna tersensitisasi (SPPT) terhadap efisiensi konversi energi listrik”. **Undergraduate Thesis–ITS**.
- [9] Agustini, S. 2013. “Fabrikasi Dye Sensitized Solar Cell Berdasarkan Fraksi Volume TiO₂ Anatase-Rutile Dengan Garcinia mangostana Dan Rhoec spatachea sebagai Dye Fotozensitizer”. **Undergraduate Thesis–ITS**.

- [10] Gratzel, M. 2004. "Conversion of sunlight to electric power by nanocrystalline dye-sensitized solar cells". **Journal of Photochemistry and Photobiology**, pp. 3–14.
- [11] Jeng, M R. 2013. "Particle Size Effects of TiO₂ Layers on the Solar Efficiency of Dye-Sensitized Solar Cells. **Hindawi Publishing Corporation International Journal of Photoenergy**. Volume 2013, pp. 9.
- [12] Varghese, K. Grimes, C A. 2008. "Appropriate Strategies For Determining The Photoconversion Efficiency of Water Photoelectrolysis Cells: A Review With Examples Using Titania Nanotube Array Photoanodes Oomman". **Solar Energy Materials & Solar Cells**. Volume 92, pp. 374–384.
- [13] <http://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/fill-factor>. Diakses pada 5 Mei 2015 pukul 19.56 WIB.
- [14] Belarbi, M. 2013. "Study of the Equivalent Circuit of A Dye Sensitized Solar Cells". **Advanced Energy: An International Journal**. Volume 1.
- [15] Bube, R H. 1998. "Photovoltaic Material". **Imperial College Press**, pp. 8.
- [16] <http://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/shunt-resistance>. Diakses pada 3 Mei 2015 pukul 10.43 WIB.
- [17] <http://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/series-resistance>. Diakses pada 22 April 2015 pukul 11.15 WIB.
- [18] Sze, S M. "Physics of Semiconductor Devices". **Wiley Inter Science**. Edisi II, pp. 806.
- [19] Liu, W. Hua, L. Dai, S. Guo, L. Jiang, N. Kou, D. 2010. "The Effect of The Series Resistance in Dye-Sensitized Solar Cells Explored By Electron Transport and Back Reaction Using Electrical and Optical Modulation Techniques". **Electrochimica Acta**. Volume 55, pp. 2338–2343.
- [20] Lestari, B. 2014. "Optimalisasi Fraksi Volume TiO₂ Anatase dan Rutile terhadap Efisiensi DSSC (Dye Sensitized Solar Cell)". **Undergraduate Thesis–ITS**.

- [21] Molea, A. Popescu. 2011. "The Obtaining of Titanium Dioxide Nanocrystalline Powders". **Optoelectronics And Advanced Materials**. Volume 5, pp. 242 – 246.
- [22] Putri, I E. 2013. "Studi Awal Kinetika Pertumbuhan Nanopartikel TiO₂ dari TiCl₃ dengan Metode Kopresipitasi". **Undergraduate Thesis–ITS**.
- [23] Kao, M C. Chen, H Z. Young, S L. Kung, C Y. Lin, C C. 2009. "The effects of the thickness of TiO₂ films on the performance of dye-sensitized solar cells". **Thin Solid Films**, pp. 5096–5099.
- [24] User Manual MS6612 Multi-functional Light Meter. **Mastech Instrument**.
- [25] Owner's manual Pyranometer Model SP-110 and SP-230. **Apogee Instruments**.
- [26] <http://www.pveducation.org/pvcdrom/modules/mismatch-for-cells-connected-in-series>. Diakses pada 22 April 2015 pukul 22.15 WIB.
- [27] <http://www.pveducation.org/pvcdrom/modules/mismatch-for-cells-connected-in-parallel>. Diakses pada 26 April 2015 pukul 07.45 WIB.
- [28] Lin, H. Huang, C P. Li, W. Ni, C. Ismat, S S. Tseng, Y H. 2006. "Size dependency of nanocrystalline TiO₂ on its optical property and photocatalytic reactivity exemplified by 2-chlorophenol". **Applied Catalysis**, pp. 1-11.
- [29] Bisquert, J. Zaban, A.Salvador, P. 2002. "Analysis of the Mechanisms of Electron Recombination in Nanoporous TiO₂ Dye-Sensitized Solar Cells. Nonequilibrium Steady-State Statistics and Interfacial Electron Transfer via Surface States". **Journal of Physics and Chemistry**, pp. 8774-8782.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LAMPIRAN A KODE PEMROGRAMAN METODE NUMERIK DENGAN MATLAB

```
clear all;
close all;
clc;

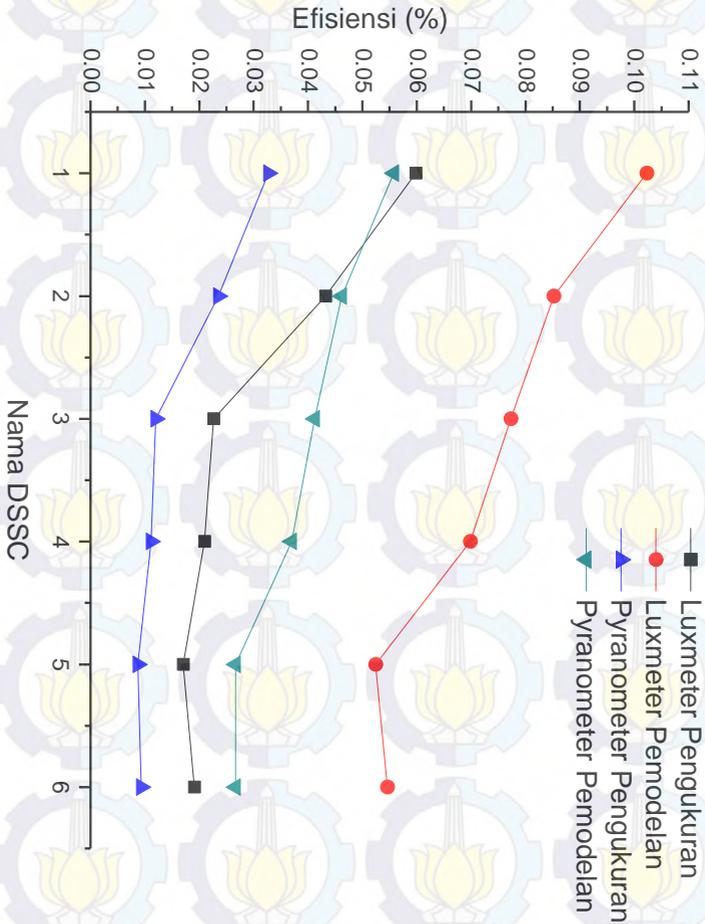
function y = solarCellFunction(v,~)
    Isc = ; %diisi dengan hasil pengukuran
    Io = ; %diisi berdasarkan persamaan
           (2.11)
    vt = ; %diisi dengan hasil pengukuran
    y = Isc - Io.*(exp(v/vt)-1);
end

v = linspace(0, a ,100); %a diganti dengan vt
                             hasil pengukuran

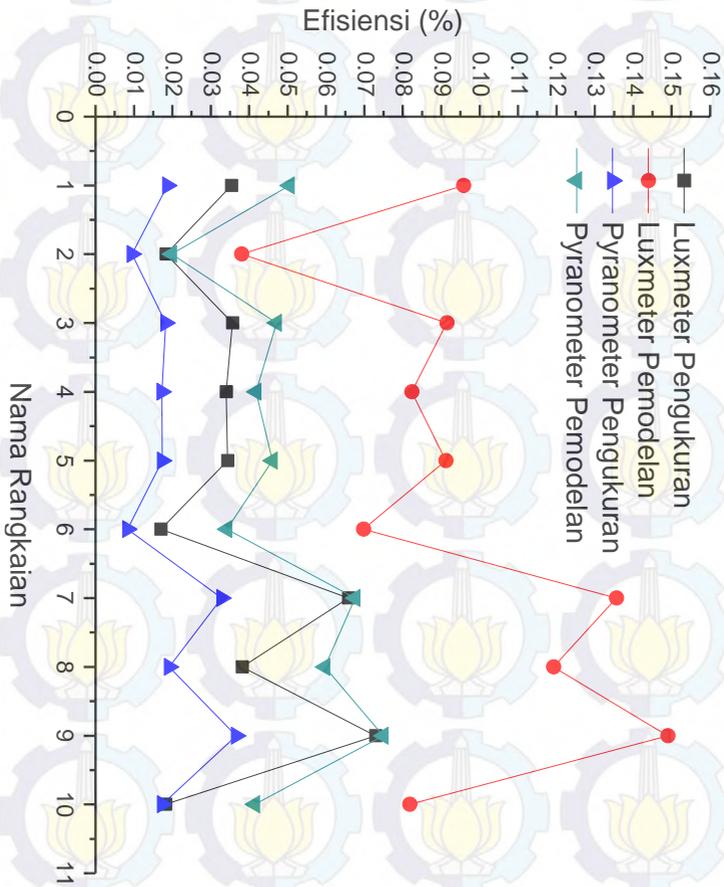
v1 = zeros(size(v));
I = zeros(size(v));
Rs = ; %diisi berdasarkan persamaan (2.15)
for i = 1:numel(v)
    I(i) = solarCellFunction(v(i),Rs);
    v1(i) = v(i) - I(i)*Rs;
end

I = (I*1000)./1;
plot(v1(1:end),I(1:end),'linewidth',2);
axis([0 0.4 min(I(:)) 0.12]);
disp('Data v');
disp(v1(:));
disp('Data I');
disp(I(:));
```

LAMPIRAN B GRAFIK EFISIENSI TIAP DSSC



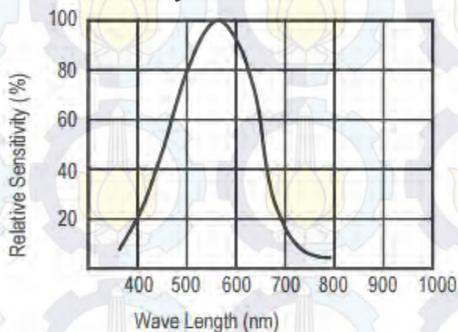
LAMPIRAN C GRAFIK EFISIENSI TIAP RANGKAIAN



LAMPIRAN D SPESIFIKASI LUXMETER

Technical data of Luxmeter Mastech MS6612

- Temperature range:
 - Operation : -10~50 °C, max 80% HR (Non-Condensed)
 - Storage: -10~50 °C, max 80% HR (Non-Condensed) (removing batteries)
- Sampling rate: >2 times/s
- Display: 3 ½ digits, max reading of 1999, with analog bar display
- Sensor: silicon photoelectric diode
- Measured spectral range: 320~730 nm
- Measurement ranges: 20, 200, 2000, 20000, 200000 Lux or 20, 200, 2000, 20000 FC
- Battery life: Approx. 200 hours
- Power supply: 1x9 V, IIEC 6LR61
- Dimensions (HxWxD): (190x89x42,5) mm
- Weight: Approx. 360 g without batteries
Approx. 420 g with batteries
- Accuracy: +- 3% (calibrated with incandescent lamps in 2854K)
+₋ 6% other visible light source
- Luminous sensitivity characteristics:



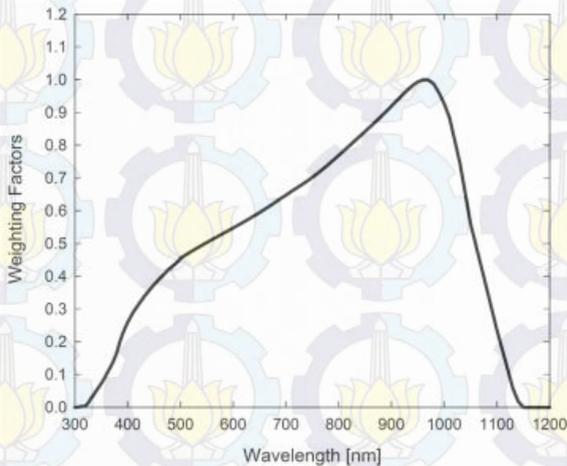
LAMPIRAN E SPESIFIKASI PYRANOMETER

Technical data of Pyranometer Apogee SP-110

- Power Supply: SP-230 integrated heaters: 12 VDC with a nominal current draw of 15 mA
- Sensitivity: 0.20 mV per W m⁻²
- Calibration Factor: 5.0 W m⁻² per mV (reciprocal of sensitivity)
- Calibration Uncertainty: $\pm 5 \%$ (see Calibration Traceability below)
- Measurement Repeatability: $< 1 \%$
- Non-stability (Long-term Drift): $< 2 \%$ per year
- Non-linearity: $< 1 \%$ (up to 1750 W m⁻²)
- Response Time: < 1 ms
- Field of View: 180°
- Spectral Range: 360 nm to 1120 nm (wavelengths where response is 10 % of maximum; see Spectral Response below)
- Directional (Cosine) Response: $\pm 5 \%$ at 75° zenith angle (see Cosine Response below)
- Temperature Response: $-0.04 \pm 0.04 \%$ per C (see Temperature Response below)
- Operating Environment: -40 to 70 C, 0 to 100 % relative humidity
- Dimensions: 2.40 cm diameter and 2.75 cm height
- Mass: 90 g (with 5 m of lead wire)
- Cable: 5 m of shielded, twisted-pair wire. Additional cable available in multiples of 5 m Santoprene rubber jacket (high water resistance, high UV stability, flexibility in cold conditions) Pigtail lead wires
- Calibration Traceability: Apogee Instruments SP series pyranometers are calibrated through side-by-side comparison to the mean of four Apogee model SP-110

transfer standard pyranometers (shortwave radiation reference) under high intensity discharge metal halide lamps. The transfer standard pyranometers are calibrated through side-by-side comparison to the mean of at least two ISO-classified reference pyranometers under sunlight (clear sky conditions) in Logan, Utah. Each of four ISO-classified reference pyranometers are recalibrated on an alternating year schedule (two instruments each year) at the National Renewable Energy Laboratory (NREL) in Golden, Colorado. NREL reference standards are calibrated to the World Radiometric Reference (WRR) in Davos, Switzerland.

- Spectral response:



BIODATA PENULIS



Penulis masuk Jurusan Teknik Fisika ITS pada tahun 2011 dan menyelesaikan studinya selama 4 tahun. Selain aktif di organisasi, penulis juga aktif mengelola website www.warstek.net yang didirikannya dengan tujuan membuat teknologi dan sains menjadi mudah, asyik, dan menyenangkan.

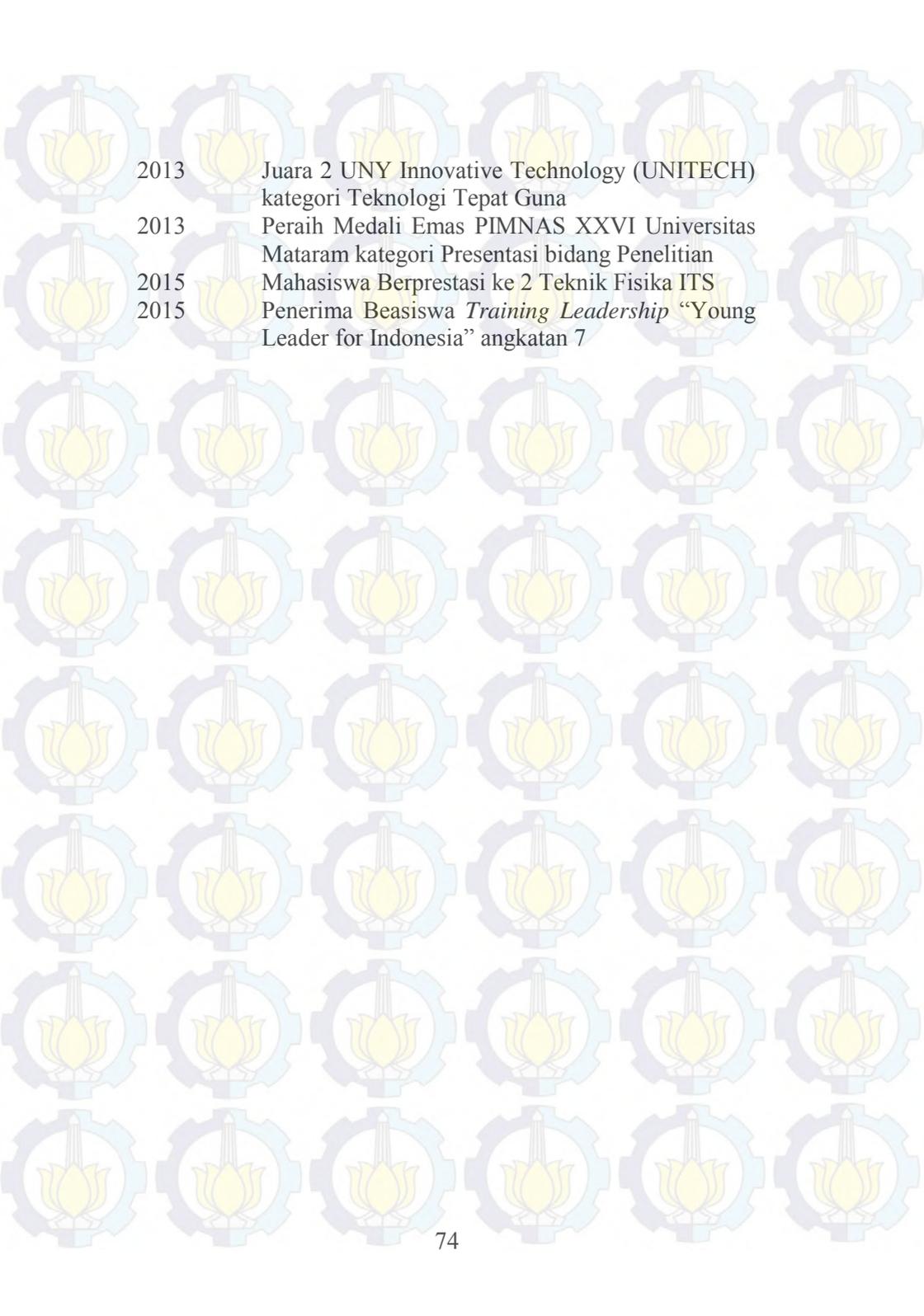
Nama Lengkap : Nur Abdillah Siddiq
Tempat/Tanggal Lahir : Sumenep, 11 Oktober 1993
Alamat : Jl. Nangka Karangduak No. 17 Sumenep
Madura
Alamat Email : siddiq.tf@gmail.com
Website Pribadi : fullerena.blogspot.com

Riwayat Pendidikan:

SDN III Karangduak : 2000-2006
SMPN 1 Sumenep : 2006-2009
SMAN 1 Sumenep : 2009-2011
Teknik Fisika ITS : 2011-2015

Prestasi Selama Kuliah:

2012 Juara 1 Kompetisi Essay UKM Penalaran ITS
2012 Juara 1 Business Plan SiBoy (Sistem Information Business on Holiday)
2012 Peraih Medali Perak PIMNAS XXV Universitas Muhammadiyah Yogyakarta kategori Presentasi bidang Kewirausahaan
2013 Juara III Kompetisi Essay LDJ Ibnu Muqhlah ITS
2013 Mahasiswa Berprestasi ke 3 Teknik Fisika ITS

- 
- 2013 Juara 2 UNY Innovative Technology (UNITECH) kategori Teknologi Tepat Guna
 - 2013 Peraih Medali Emas PIMNAS XXVI Universitas Mataram kategori Presentasi bidang Penelitian
 - 2015 Mahasiswa Berprestasi ke 2 Teknik Fisika ITS
 - 2015 Penerima Beasiswa *Training Leadership* “Young Leader for Indonesia” angkatan 7