

FABRIKASI DAN KARAKTERISASI *HETEROJUNCTION SOLAR CELL* BERBAHAN Cu_2O DAN KOMPOSIT MgO-SnO_2

SKRIPSI



Oleh:
ALI ZAENUDIN
NIM. 12640001

**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAULANA MALIK IBRAHIM
MALANG
2016**

**FABRIKASI DAN KARAKTERISASI *HETEROJUNCTION SOLAR CELL*
BERBAHAN Cu_2O DAN KOMPOSIT MgO-SnO_2**

SKRIPSI

Diajukan kepada:

**Fakultas Sains dan Teknologi
Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang
Untuk Memenuhi Salah Satu Persyaratan Dalam
Memperoleh Gelar Sarjana Sains (S.Si)**

Oleh:

**ALI ZAENUDIN
NIM. 12640001**

**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAULANA MALIK IBRAHIM
MALANG
2016**

HALAMAN PERSETUJUAN

**FABRIKASI DAN KARAKTERISASI *HETEROJUNCTION SOLAR CELL*
BERBAHAN Cu_2O DAN KOMPOSIT MgO-SnO_2**

SKRIPSI

Oleh:
ALI ZAENUDIN
NIM. 12640001

Telah Diperiksa dan Disetujui untuk Diuji:
Pada Tanggal: 06 Juni 2016

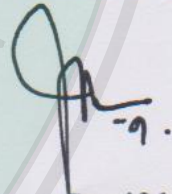
Pembimbing I,



Erna Hastuti, M.Si

NIP. 19811119 200801 2 009

Pembimbing II,



Umaiatus Syarifah, M.A

NIP. 19820925 200901 2 005

Mengetahui,
Ketua Jurusan Fisika



Erna Hastuti, M.Si

NIP. 19811119 200801 2 009


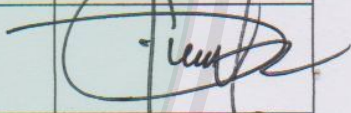
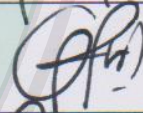
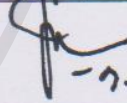
HALAMAN PENGESAHAN

FABRIKASI DAN KARAKTERISASI *HETEROJUNCTION SOLAR CELL* BERBAHAN Cu_2O DAN KOMPOSIT MgO-SnO_2

SKRIPSI

Oleh:
ALI ZAENUDIN
NIM. 12640001

Telah Dipertahankan di Depan Dewan Penguji Skripsi Dan
Dinyatakan Diterima Sebagai Salah Satu Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Sains (S.Si)
Tanggal: Juni 2016

Penguji Utama	: <u>Farid Samsu Hananto, M.T</u> NIP. 19740513 200312 1 001	
Ketua Penguji	: <u>Drs. M. Tirono, M.Si</u> NIP. 19641211 199111 1 001	
Sekretaris Penguji	: <u>Erna Hastuti, M.Si</u> NIP. 19811119 200801 2 009	
Anggota Penguji	: <u>Umaiyatus Syarifah, M.A</u> NIP. 19820925 200901 2 005	

Mengesahkan,
Ketua Jurusan Fisika



Erna Hastuti, M.Si
NIP. 19811119 200801 2 009

PERNYATAAN KEASLIAN TULISAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Ali Zaenudin

NIM : 12640001

Jurusan : Fisika

Fakultas : Sains dan Teknologi

Judul Penelitian : Fabrikasi dan Karakterisasi *Heterojunction Solar Cell*
Berbahan Cu_2O dan Komposit MgO-SnO_2

Menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa hasil penelitian saya ini tidak terdapat unsur-unsur penjiplakan karya penelitian atau karya ilmiah yang pernah dilakukan atau dibuat oleh orang lain, kecuali yang tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata hasil penelitian ini terbukti terdapat unsur-unsur jiplakan maka saya bersedia untuk mempertanggung jawabkan, serta diproses sesuai peraturan yang berlaku.

Malang, 21 Juni 2016
Yang Membuat Pernyataan,



Ali Zaenudin
NIM. 12640001

MOTTO

يَا أَيُّهَا الَّذِينَ آمَنُوا هَلْ أَدُلُّكُمْ عَلَىٰ تِجَارَةٍ تُنْجِيكُمْ مِّنْ عَذَابِ أَلِيمٍ (١٠) تُوْمِنُونَ بِاللّٰهِ
وَرَسُولِهِ وَتُجَاهِدُونَ فِي سَبِيلِ اللّٰهِ بِأَمْوَالِكُمْ وَأَنفُسِكُمْ, ذَلِكَ خَيْرٌ لَّكُمْ إِن كُنتُمْ تَعْلَمُونَ
(١١) يَغْفِرْ لَكُمْ دُنُوبَكُمْ وَيُدْخِلْكُمْ جَنَّاتٍ تَجْرِي مِنْ تَحْتِهَا الْأَنْهَارُ وَمَسْكِنٍ طَيِّبَةٍ فِي
جَنَّاتٍ عَدْنٍ, ذَلِكَ الْفَوْزُ الْعَظِيمُ (١٢)

“Hai orang-orang yang beriman, sukakah kamu aku tunjukkan suatu perniagaan yang dapat menyelamatkanmu dari azab yang pedih?. (yaitu) kamu beriman kepada Allah dan RasulNya dan berjihad di jalan Allah dengan harta dan jiwamu. Itulah yang lebih baik bagimu, jika kamu mengetahui. Niscaya Allah akan mengampuni dosa-dosamu dan memasukkanmu ke dalam jannah yang mengalir di bawahnya sungai-sungai; dan (memasukkan kamu) ke tempat tinggal yang baik di dalam jannah 'Adn. Itulah keberuntungan yang besar.” (Q.S as-Shaff: 10-12).

“Sabar dalam menghadapi sesuatu yang belum dan mungkin sulit dipahami untuk melukis sejarah dengan tinta emas.”

HALAMAN PERSEMBAHAN



Alhamdulillahirobbil'alamin, tak henti-henti aku bersyukur kepada Allah Swt atas segala ni'mat yang telah diberikan. Karena-Nya aku mendapat kesempatan untuk mengukir kata "SUKSES" pada papan emas yang abadi. Semoga Allah meridloi atas usaha yang telah aku lakukan dan memberi barokah terhadap hasil yang aku peroleh. Amiin..

Perjuangan yang pahit selama empat tahun terasa indah karena hadirnya mereka yang aku sayangi..

Kepada kedua orang tuaku

Bapak Fatawi, Bapak yang selalu tenang, sabar dan penuh tanggung jawab. Ibu Amini, Ibu yang selalu perhatian, penuh dengan harapan dan kasih sayang. Terimakasih telah menyayangiku, mempercayaku, dan menyebut namaku dalam setiap do'a.

Kepada saudariku

*Teruntuk mbak dan adekku, Binti Nurrohmi dan Desi Nuryatul Safitri
Terimakasih atas segala dukungan, motivasi dan do'anya.
Semoga Allah menjadikan kita sebagai anak yang sholih-sholihah dan selalu berbakti kepada orang tua.*

Kepada Dosen-dosenku

*Terimakasih telah memberikan banyak ilmu kepadaku, maafkanlah segala salahku, aku mengharap ridlomu sebagai seorang guru.
Teruntuk Ibu Erna Hastuti, M.Si dan Ibu Umayyatus Syarifat, M.A, terimakasih telah meluangkan banyak waktu untuk membimbingku.*

Kepada teman-temanku

Terimakasih kepada Naufal, Baqi, Ja'far, Nadzir, Makbul, Agus, Mukarromah, Vera, Lila dan Ifa yang telah memberikan banyak motivasi serta aktif membantu penelitian ini. Terkhusus kepada Mukarromah, terimakasih telah telaten dan sabar dalam mengoreksi dan memberi masukan pada karya sederhana ini.

Kepada teman-teman MSC (Material Science Community) dan Fisika 2012

*Terimakasih telah memberiku banyak kenangan selama masa perjuangan.
Semoga kita mendapatkan hasil yang barokah dan bermanfaat. Amiin..*

KATA PENGANTAR



Assalamu'alaikum Wr. Wb

Alhamdulillah *robbil'alamiin*, puja dan puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah Swt yang telah melimpahkan rahmat, taufiq serta hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan studi fisika di Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri (UIN) Maulana Malik Ibrahim Malang. Shalawat serta salam semoga senantiasa terlimpahkan kepada Nabi Muhammad Saw., para sahabat, dan segenap orang yang mencintainya.

UIN Maulana Malik Ibrahim Malang telah memberi cara pandang baru kepada penulis untuk mengagumi segala ciptaan-Nya. Penulis semakin menyadari bahwa dengan melihat ayat-ayat kauniyah-Nya (melihat tanda-tanda yang Allah ciptakan pada alam semesta) merupakan cara yang sangat tepat untuk mendekatkan diri kepada-Nya dan fisika merupakan salah satu ilmu yang akan mengantarkannya. Model integrasi sains dan al-Qur'an memberikan warna tersendiri kepada penulis dalam belajar fisika.

Skripsi dengan judul "**Fabrikasi dan Karakterisasi *Heterojunction Solar Cell* Berbahan Cu_2O dan Komposit MgO-SnO_2** " ini merupakan karya sederhana dari penulis dalam mengaplikasikan ilmu fisika untuk memperoleh energi listrik dari cahaya matahari. Skripsi ini diajukan kepada Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang untuk memenuhi salah satu persyaratan dalam memperoleh gelar sarjana sains (S.Si) serta untuk kemajuan ilmu

pengetahuan dan teknologi *solar cell* sebagai pembangkit listrik yang ramah lingkungan.

Pada kesempatan ini, penulis menyampaikan terima kasih dan do'a *Jzakumullahu ahsanal jaza'* kepada:

1. Kedua orang tuaku, Bapak Fatawi dan Ibu Amini yang selalu memberikan kepercayaan, kasih sayang, usaha dan doa kepada penulis. Serta kakak dan adek penulis, Binti Nurrohmi dan Desi Nuryatul Safitri.
2. Prof. Dr. H. Mudjia Rahardjo, M.Si selaku Rektor Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang yang selalu memberikan pengetahuan dan pengalaman yang berharga.
3. Dr. drh. Bayyinatul Muchtaromah, M.Si selaku Dekan Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.
4. Erna Hastuti, M.Si selaku Ketua Jurusan Fisika Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.
5. Erna Hastuti, M.Si selaku dosen pembimbing skripsi yang telah memberikan ilmu dan waktunya untuk mengarahkan penulis agar skripsi ini tersusun dengan baik.
6. Umayyatus Syarifah M.A selaku dosen pembimbing agama, yang bersedia memberikan arahan dalam mengintegrasikan ayat-ayat kauniyah dengan penelitian yang penulis lakukan.
7. Segenap Dosen, Laboran, dan Admin Jurusan Fisika Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang yang senantiasa memberikan ilmu pengetahuan dan pengarahan.

8. Teman-teman fisika angkatan 2012 yang selalu menemani dan memberikan banyak motivasi yang berharga.
9. Semua pihak yang secara langsung maupun tidak langsung memberikan motivasi dan bantuan dalam penulisan skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa masih ada banyak kekurangan dan kekeliruan dalam skripsi ini. Oleh karena itu, segala kritik dan saran yang bersifat konstruktif sangat penulis harapkan demi kesempurnaan skripsi ini. Penulis berharap semoga skripsi ini dapat memberi manfaat dan menambah khazanah ilmu pengetahuan baik bagi penulis sendiri maupun yang lainnya. *Amin Ya Rabbal Alamin Wassalamu'alaikum Wr. Wb.*

Malang, 5 juni 2016

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGAJUAN	ii
HALAMAN PERSETUJUAN	iii
HALAMAN PENGESAHAN	iv
HALAMAN PERNYATAAN KEASLIAN TULISAN	v
MOTTO	vi
HALAMAN PERSEMBAHAN	vii
KATA PENGANTAR	viii
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL	xiv
DAFTAR LAMPIRAN	xv
ABSTRAK	xvi
ABSTRACT	xvii
مستخلص البحث	xviii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	5
1.3 Tujuan Penelitian	5
1.4 Manfaat Penelitian	6
1.5 Batasan Masalah	6
BAB II DASAR TEORI	7
2.1 <i>Solar Cell</i>	7
2.2 Material Penyusun <i>Solar Cell</i>	9
2.2.1 Semikonduktor Tipe-n	12
2.2.2 Semikonduktor Tipe-p	13
2.2.3 <i>Pn-junction</i> Semikonduktor	13
2.3 Proses Konversi Energi <i>Solar Cell</i>	15
2.4 Efisiensi <i>Solar Cell</i>	19
2.5 <i>Heterojunction Solar Cell</i>	20
2.6 Karakteristik Bahan	21
2.6.1 Komposit MgO-SnO ₂	21
2.6.2 Tembaga Oksida (Cu ₂ O)	25
2.7 Spektrofotometer UV-Vis	28
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	30
3.1 Jenis Penelitian	30
3.2 Waktu dan Tempat penelitian	30
3.3 Alat dan Bahan	30
3.3.1 Alat Penelitian	30
3.3.2 Bahan Penelitian	31
3.4 Prosedur Preparasi Sampel	32
3.4.1 Pembersihan Kaca LCD	32
3.4.2 Pembuatan Larutan	32
3.4.3 Proses Pendeposisian Cu ₂ O	33
3.4.4 Pembuatan Pasta MgO-SnO ₂	35

3.4.5 Pelapisan MgO-SnO ₂ pada Lapisan Cu ₂ O	35
3.4.6 Pelapisan Elektroda Perak (Ag)	36
3.5 Pengujian Karakteristik <i>Solar Cell</i>	36
3.5.1 Pengujian Absorbansi Lapisan Cu ₂ O/MgO-SnO ₂	36
3.5.2 Pengujian Sifat Hambatan <i>Heterojunction Solar Cell</i>	37
3.5.3 Pengujian Efisiensi <i>Solar Cell</i>	38
3.6 Diagram Alir	40
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	41
4.1 Hasil Penelitian	41
4.1.1 Sampel <i>Heterojunction Solar Cell</i>	41
4.1.2 Pengujian <i>Solar Cell</i>	45
4.2 Pembahasan	54
BAB V PENUTUP	66
5.1 Kesimpulan	66
5.2 Saran	67
DAFTAR PUSTAKA	
LAMPIRAN	



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Perbedaan Antara Energi Gap Bahan Konduktor, Semikonduktor, dan Isolator	10
Gambar 2.2	Radiasi Cahaya yang Direfleksikan, Diserap, dan Ditransmisikan Oleh Bahan	11
Gambar 2.3	Hubungan Antara Model Jalur dan Struktur <i>Pn-Junction</i> Semikonduktor.....	14
Gambar 2.4	Distribusi Pembawa dalam <i>Pn-junction</i> Semikonduktor	14
Gambar 2.5	Dioda Bias Mundur	16
Gambar 2.6	<i>Pn-junction Solar Cell</i> dengan Beban Resistor	17
Gambar 2.7	Daya Maksimum dari Karakteristik I-V <i>Solar Cell</i>	19
Gambar 2.8	Diagram Pita Energi <i>Pn-heterojunction</i> dalam Keadaan Kesetimbangan Termal.....	20
Gambar 2.9	Struktur Kristal MgO	22
Gambar 2.10	Struktur Kristal SnO ₂	23
Gambar 2.11	Struktur <i>Cubic Cuprite</i> dari Cu ₂ O.....	25
Gambar 3.1	Pelapisan <i>Scotch Tape</i> pada Permukaan Lapisan TCO kaca LCD	34
Gambar 3.2	Proses Pendeposisian Lapisan Cu ₂ O	34
Gambar 3.3	Alat Spektrofotometer GENESYS 10S UV-Vis.....	37
Gambar 3.4	Pengujian Hambatan <i>Heterojunction Solar Cell</i>	38
Gambar 3.5	Rangkaian Uji <i>Solar Cell</i>	39
Gambar 4.1	Struktur Lapisan <i>Heterojunction Solar Cell</i>	42
Gambar 4.2	Grafik Absorbansi Lapisan Cu ₂ O/MgO-SnO ₂ terhadap Panjang Gelombang	46
Gambar 4.3	Perubahan Absorbansi Lapisan Cu ₂ O/MgO-SnO ₂ terhadap <i>Annealing</i> Cu ₂ O	47
Gambar 4.4	Pergeseran Absorbansi Lapisan Cu ₂ O/MgO-SnO ₂ terhadap <i>Annealing</i> Cu ₂ O	48
Gambar 4.5	Rangkaian Pengujian <i>Heterojunction Solar Cell</i>	51
Gambar 4.6	Grafik I-V <i>Heterojunction Solar Cell</i> pada Sampel 3 dengan Menggunakan Lampu Halogen.....	54
Gambar 4.7	Skema Aliran <i>electron-hole</i> pada Bias Mundur	61
Gambar 4.8	Proses Terjadinya Pasangan <i>Electron-hole</i>	63

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Karakteristik Magnesium Oksida	22
Tabel 2.2	Karakteristik Tin Oksida	23
Tabel 2.3	Sifat Fundamental Cu_2O pada Temperatur Ruang	26
Tabel 4.1	Pengaruh Variasi <i>Annealing</i> Cu_2O terhadap Absorbansi Lapisan $\text{Cu}_2\text{O}/\text{MgO}-\text{SnO}_2$	47
Tabel 4.2	Pengaruh Variasi <i>Annealing</i> Cu_2O terhadap Pergeseran Absorbansi Maksimum Lapisan $\text{Cu}_2\text{O}/\text{MgO}-\text{SnO}_2$	48
Tabel 4.3	Data Hasil Pengujian Sifat Listrik <i>Heterojunction Solar Cell</i> Menggunakan Lampu Halogen	51
Tabel 4.4	Parameter Sifat Listrik dari Pengujian <i>Heterojunction Solar Cell</i> Menggunakan Lampu Halogen	53



DAFTAR LAMPIRAN

- Lampiran 1 Pengujian Absorbansi Lapisan $\text{Cu}_2\text{O}/\text{MgO}-\text{SnO}_2$
- Lampiran 2 Pengujian Hambatan *Heterojunction Solar Cell*
- Lampiran 3 Pengujian Sifat Listrik *Heterojunction Solar Cell*
- Lampiran 4 Gambar Penelitian



ABSTRAK

Zaenudin, Ali. 2016. **Fabrikasi dan Karakterisasi *Heterojunction Solar Cell* Berbahan Cu_2O dan Komposit MgO-SnO_2** . Skripsi. Jurusan Fisika Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang. Pembimbing: (I) Erna Hastuti, M.Si (II) Umayatus Syarifah, M.A

Kata kunci: *Heterojunction solar cell*, *annealing*, absorbansi, sifat listrik.

Heterojunction solar cell merupakan perangkat pengkonversi cahaya menjadi energi listrik yang sangat berpotensi untuk dikembangkan. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui performa dari *heterojunction solar cell* berbahan Cu_2O dan MgO-SnO_2 . Karakterisasi yang dilakukan meliputi pengujian absorbansi lapisan $\text{Cu}_2\text{O/MgO-SnO}_2$, serta pengujian hambatan dan sifat listrik *heterojunction solar cell* $\text{LCD/Cu}_2\text{O/MgO-SnO}_2/\text{Ag}$ terhadap variasi *annealing* Cu_2O . Hasil dari penelitian menunjukkan bahwa Absorbansi tertinggi dimiliki oleh sampel yang mengalami *annealing* Cu_2O 150°C , yaitu sebesar 4,852 a.u pada panjang gelombang 305 nm. Berdasarkan pengujian hambatan, diketahui bahwa persambungan lapisan $\text{Cu}_2\text{O/MgO-SnO}_2$ menghasilkan *pn-heterojunction* yang kurang sempurna. Efisiensi tertinggi dari *heterojunction solar cell* ditunjukkan oleh sampel yang mengalami *annealing* Cu_2O 150°C , yaitu sebesar $1,96 \times 10^{-5} \%$.

ABSTRACT

Zaenudin, Ali. 2016. **Fabrication and Characterization of Heterojunction Solar Cell Composed by Cu₂O and MgO-SnO₂ Composite**. Minithesis. Department of Physics. Faculty of Science and Technology. Islamic University of Maulana Malik Ibrahim, Malang. Advisors: (I) Erna Hastuti, M.Si (II) Umaiyatus Syarifah, M.A

Keywords: Heterojunction solar cell, annealing, absorbance, electric characteristics.

Heterojunction solar cell is a converter device which change the light into electrical energy that can be potentially developed. This research objective is knowing the performance of heterojunction solar cell that composed by Cu₂O and MgO-SnO₂. Conducted characterization covers absorbance of Cu₂O/MgO-SnO₂ layer, resistance, and electric characteristics testing of heterojunction solar cell LCD/Cu₂O/MgO-SnO₂/Ag against annealing Cu₂O variation. Result of research indicated that highest absorbance owned by sample that experienced annealing Cu₂O 150 °C, i.e. 4,852 a.u on wavelength of 305 nm. Based on resistance test , shows that layers of Cu₂O/MgO-SnO₂ formed a less perfect heterojunction. Highest efficiency from heterojunction solar cell indicated by sample that experienced annealing Cu₂O 150 °C, i.e. $1,96 \times 10^{-5} \%$.

مستخلص البحث

زين الدين. علي. ٢٠١٦. منتج وخاصة هتروجونجسين طاقة الشمس بمادة Cu_2O و كمفوسيت $MgO-SnO_2$. بحث علمي. قسم الفيزياء كلية العلوم الطبيعية والتكنولوجية جامعة مولانا مالك إبراهيم مالانج. تحت الإشراف (١) إرنا هستوتي الماجستير (٢) أمية الشريفة الماجستير.

الكلمات المفتاح: هتروجونجسين طاقة الشمس و التدفئة وإمتصاصية ومواصفة الكهريا

هتروجونجسين طاقة الشمس هو آلة تحويل الضوء أصبح طاقة الشمس للمطورة. وهدف هذا البحث هو معرفة الحال من هتروجونجسين طاقة الشمس بمادة Cu_2O و كمفوسيت $MgO-SnO_2$. وأما الخصائص المستخدم تتكون من امتصاصية طلية Cu_2O و $MgO-SnO_2$ وتجربة العقبة وصفة كهريا هتروجونجسين طاقة الشمس $LCD/Cu_2O/MgO-SnO_2/Ag$ في تنوع التدفئة Cu_2O . ونتائج البحث تدل على امتصاصية عظيمة لعينة Cu_2O $150^\circ C$ بدرجة $4,852$ a.u. في موج $305nm$. تأسيسا على تجربة العقبة أن اتصال Cu_2O ويخرج هتروجونجسين بغير الكمال. وأما فعالية هتروجونجسين طاقة الشمس تدل على التدفئة Cu_2O $150^\circ C$ بدرجة $10^{-1} \times 1,96$ %.

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Keterbatasan energi menjadi masalah utama di setiap negara. Kebutuhan energi semakin meningkat, sementara sumber utamanya yang berbasis fosil sangat terbatas dan lambat laun akan habis. Selain itu, harga energi fosil seperti bahan bakar minyak (BBM), gas dan batu bara bersifat fluktuatif karena dipengaruhi oleh kondisi politik dan perekonomian dunia. Oleh karena itu, harus ada usaha untuk memanfaatkan sumber energi lain dari bahan nonfosil yang bersifat baru terbarukan.

Pemerintah telah mengeluarkan Undang-Undang Nomor 30 Tahun 2007 yang mengamanatkan beberapa hal tentang energi terbarukan. Isi dari UU tersebut adalah pengelolaan energi harus mengutamakan kemampuan nasional, mengutamakan penggunaan energi ramah lingkungan, penyediaan energi diutamakan menggunakan energi setempat yang bersumber pada energi terbarukan serta pemerintah pusat dan daerah berkewajiban untuk menyediakan energi baru terbarukan (Anonim, 2012).

Cahaya matahari merupakan sumber energi yang melimpah, dan tidak akan habis. Pasokan energi matahari yang sampai ke bumi sangat besar, yaitu 3×10^{24} Joule pertahun atau sekitar 10.000 kali konsumsi populasi global saat ini. Dengan kata lain, andaikan 0,1 % permukaan bumi dapat ditutupi dengan sel surya yang memiliki efisiensi 10 %, maka kebutuhan energi saat ini akan terpenuhi (Timuda dan Maddu, 2010). Untuk Indonesia, karena wilayahnya

terletak di sekitar garis khatulistiwa, maka intensitas cahaya matahari yang diterima sangat tinggi yaitu sebesar 4,8 kWh/m²/hari, namun selama ini pemanfaatannya baru sebesar 12,1 MWe (Sugiyono, dkk. 2014).

Cahaya merupakan salah satu ciptaan Allah Swt yang istimewa. Allah Swt berfirman:

يَا أَيُّهَا الَّذِينَ آمَنُوا اتَّقُوا اللَّهَ وَأَمُوا بِرَسُولِهِ، يُؤْتِكُمْ كِفْلَيْنِ مِنْ رَحْمَتِهِ وَيَجْعَلْ لَكُمْ نُورًا تَمْشُونَ بِهِ، وَيَغْفِرْ لَكُمْ وَاللَّهُ غَفُورٌ رَحِيمٌ (٢٨)

“Hai orang-orang yang beriman, bertakwalah kepada Allah dan berimanlah kepada Rasul-Nya, niscaya Allah memberikan rahmatnya kepadamu dua bagian, dan menjadikan untukmu cahaya yang dengan cahaya itu kamu dapat berjalan dan Dia mengampunimu. Allah Maha Pengampun lagi Maha Penyayang.” (QS. al-Hadid [57]: 28).

Dalam ayat tersebut Allah Swt telah menjelaskan bahwa Dia-lah yang menjadikan cahaya yang menerangi langkah-langkah manusia di dunia dan di akhirat yang dengannya manusia dapat berjalan dengan aman dan santai menuju arah yang benar (Shihab, 2002). Cahaya tidak hanya bersifat sebagai penerang. Akan tetapi, menurut kajian fisika cahaya dapat dianggap sebagai gelombang dan dapat juga dianggap sebagai partikel. Partikel cahaya ini disebut foton dan mempunyai energi yang nilainya sebanding dengan frekuensi yang dipancarkannya. Oleh karena energi bersifat kekal, maka energi cahaya tersebut kemudian dapat diubah menjadi energi lain yang lebih bermanfaat, seperti halnya energi listrik. Proses konversi cahaya matahari menjadi energi listrik ini dapat diperoleh dengan menggunakan *solar cell* atau *photovoltaic*.

Solar cell adalah perangkat pengkonversi cahaya matahari menjadi energi listrik yang terbuat dari persambungan semikonduktor tipe-p dan tipe-n. Material semikonduktor yang banyak digunakan sebagai *solar cell* adalah silikon (Si). *Solar cell* ini mempunyai efisiensi sekitar 28 %, namun proses fabrikasinya tidak mudah dan membutuhkan biaya yang mahal, sehingga tidak efisien untuk diaplikasikan secara masal. Oleh karena itu, untuk memperoleh manfaat yang lebih besar dari melimpahnya energi matahari, maka perlu dibuat *solar cell* dari material baru yang lebih murah dan mudah diproses, serta mampu menghasilkan efisiensi yang tinggi.

Cuprous oxide (Cu_2O) merupakan bahan semikonduktor tipe-p yang berpotensi untuk dikembangkan sebagai *solar cell*. Material ini mempunyai *band gap* sekitar 2 eV (Fukuda dan Ichimura, 2013), tidak beracun, melimpah, dan mudah dalam proses fabrikasinya (Abdu dan Musa, 2009). Menurut (Ying, 2014), Cu_2O mampu mengkonversi energi dengan efisiensi mencapai 20 %.

Cu_2O dapat diperoleh dengan metode *thermal oxidation*, *electrodeposition*, *sputtering*, dan *chemical bath deposition* (CBD). Pelapisan Cu_2O menggunakan metode CBD telah dilakukan oleh Timuda (2006) dengan variasi ketebalan dan suhu *annealing*. Dari penelitian tersebut diketahui bahwa semakin tebal lapisan Cu_2O menyebabkan peningkatan nilai absorbansi, reflektansi dan indeks bias, sedangkan nilai transmitansinya menurun. Perlakuan panas (*annealing*) juga menyebabkan perubahan pada beberapa sifat optik. Semakin tinggi suhu *annealing* menyebabkan nilai absorbansi, reflektansi dan indeks bias semakin turun, sedangkan nilai transmitansi semakin meningkat. Pada penelitian

ini juga diketahui bahwa semikonduktor Cu_2O yang dihasilkan dengan metode CBD mempunyai *band gap* antara 2,35 – 2,42 eV.

Cu_2O dapat dihubungkan dengan lapisan semikonduktor tipe-n seperti TiO_2 , SnO_2 , dan ZnO sehingga terbentuk *pn-heterojunction solar cell*. Motoyoshi dkk (2010) telah meneliti *photovoltaic (solar cell)* dengan struktur ITO/ $\text{Cu}_2\text{O}:\text{C}_{60}$. *Photovoltaic* ini mempunyai efisiensi (η) sebesar $4,3 \times 10^{-3} \%$ dengan tegangan *open-circuit* (V_{oc}) 0,17 V, arus *short-circuit* (I_{sc}) 0,11 mA/cm², dan *factor fill* (FF) sebesar 0,23. Fukuda dan Ichimura (2013) telah membuat *solar cell* dengan struktur $\text{SnO}_2/\text{Cu}_2\text{O}$ dan mampu menghasilkan efisiensi sebesar $6,6 \times 10^{-2} \%$ dengan V_{oc} 0,29 V, I_{sc} 0,58 mA/cm², dan FF 0,39. Dari kedua penelitian tersebut, diketahui bahwa *solar cell* dengan struktur $\text{SnO}_2/\text{Cu}_2\text{O}$ mempunyai efisiensi yang lebih tinggi daripada ITO/ $\text{Cu}_2\text{O}:\text{C}_{60}$, tetapi masih terlalu rendah untuk diproduksi dan diaplikasikan secara masal.

Usaha untuk meningkatkan efisiensi *solar cell* pada penelitian ini dilakukan dengan memvariasikan suhu *annealing* Cu_2O dan menghubungkannya dengan komposit MgO-SnO_2 sehingga terbentuk *pn-heterojunction* dengan struktur $\text{Cu}_2\text{O}/\text{MgO-SnO}_2$. SnO_2 merupakan material semikonduktor tipe-n dengan lebar *band gap* 3,6 eV (Singh, 2013), mempunyai transmitansi optik yang baik, resistivitasnya rendah, stabil pada perlakuan panas, dan cocok untuk diaplikasikan sebagai *solar cell* (Ali, 2013). Sedangkan MgO merupakan bahan dengan *defect* (cacat) yang baik serta dapat meningkatkan sifat optik dan konduktivitas listrik (Ningtyas, 2015). Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan oleh Rahayu (2015), komposit MgO-SnO_2 yang diperoleh dengan

perbandingan 1:1 dan suhu kalsinasi 700 °C selama 1 jam menghasilkan konduktivitas listrik sebesar $471,32 (\Omega\text{m})^{-1}$, dan fasa yang terbentuk adalah MgO, SnO₂, MgSnO₃ (*magnesium stannate*) dan Mg₂SnO₄ (*magnesium orthostannate*). Dari karakterisasi sifat optik yang dilakukan oleh Ningtyas (2015), diketahui bahwa komposit MgO-SnO₂ tersebut memiliki *band gap* sebesar 4,39 eV.

Lapisan Cu₂O pada *pn-heterojunction* Cu₂O/MgO-SnO₂ diperoleh dengan metode *chemical bath deposistion* (CBD), sedangkan lapisan komposit MgO-SnO₂ didapatkan dengan metode *doctor blade*. Kedua metode ini dipilih karena prosesnya mudah dan murah serta diharapkan dapat menghasilkan efisiensi yang lebih tinggi daripada penelitian-penelitian sebelumnya.

1.2 Rumusan Masalah

- 1) Bagaimana pengaruh suhu *annealing* Cu₂O terhadap absorbansi lapisan Cu₂O/MgO-SnO₂?
- 2) Bagaimana pengaruh suhu *annealing* terhadap hambatan *heterojunction solar cell* kaca LCD/Cu₂O/MgO-SnO₂/Ag?
- 3) Bagaimana pengaruh suhu *annealing* Cu₂O terhadap sifat listrik *heterojunction solar cell* kaca LCD/Cu₂O/MgO-SnO₂/Ag?

1.3 Tujuan Penelitian

- 1) Mengetahui pengaruh suhu *annealing* Cu₂O terhadap absorbansi lapisan Cu₂O/MgO-SnO₂.
- 2) Mengetahui pengaruh suhu *annealing* terhadap hambatan *heterojunction solar cell* kaca LCD/Cu₂O/MgO-SnO₂/Ag.

- 3) Mengetahui pengaruh suhu *annealing* Cu_2O terhadap sifat listrik *heterojunction solar cell* LCD/ Cu_2O / MgO-SnO_2 /Ag.

1.4 Manfaat Penelitian

- 1) Memberikan informasi mengenai pengembangan *solar cell* berbahan dasar Cu_2O , MgO dan SnO_2 .
- 2) Menambah pustaka penelitian nasional mengenai peningkatan efisiensi *solar cell* dengan biaya yang murah dan mudah dalam fabrikasinya.

1.5 Batasan Masalah

- 1) Semikonduktor tipe-p diperoleh dari Cu_2O yang dideposisikan menggunakan metode *chemical bath deposition* (CBD) dengan siklus pencelupan sebanyak 20 kali. Secara teori, setiap 10 siklus pencelupan, ketebalan Cu_2O akan bertambah sebesar $\approx 0,15 \mu\text{m}$ (Timuda dan Maddu, 2010).
- 2) Material yang digunakan sebagai semikonduktor tipe-n adalah komposit MgO-SnO_2 dengan perbandingan 1:1.
- 3) Pengukuran hambatan *heterojunction solar cell* dilakukan seperti menguji hambatan dioda pada bias maju dan bias mundur.
- 4) Pengujian sifat listrik *heterojunction solar cell* yang dilakukan meliputi besarnya arus (I), voltase (V), daya (P), dan efisiensi (η).

BAB II DASAR TEORI

2.1 Solar Cell

Solar cell merupakan perangkat pengkonversi cahaya matahari menjadi energi listrik dan terbuat dari dua buah semikonduktor, yaitu semikonduktor tipe-p dan tipe-n (Effendy, 2010). *Solar cell* pertama kali dipergunakan pada tahun 1950 untuk menyediakan energi listrik pada beberapa kendaraan dan sistem satelit komunikasi. *Solar cell* digunakan sebagai alternatif untuk pembangkit listrik karena perangkat ini tidak membutuhkan pemeliharaan dalam periode yang lama (5 sampai 10 tahun) dan menawarkan ketahanan maksimum tanpa berpengaruh terhadap efisiensi konversi energinya. Berbagai keuntungan lain yang diberikan oleh *solar cell* adalah ramah lingkungan, efisien, dapat diandalkan, dan mempunyai sumber yang tidak terputus (energi matahari) untuk diubah menjadi energi listrik (Jha, 2010).

Penggunaan *solar cell* sebagai penghasil energi listrik merupakan suatu pilihan yang tepat. Energi matahari yang sampai di permukaan bumi mencapai $2,6 \times 10^{24}$ Joule setiap tahunnya. Sementara, saat ini total kebutuhan energi di seluruh dunia sebesar 10 Terra Watt atau setara dengan 3×10^{20} Joule/tahun dan diperkirakan akan terus meningkat hingga 30 Terra Watt pada tahun 2030. Kebutuhan energi ini akan terpenuhi jika 0,05 % luas permukaan bumi ditutup dengan *solar cell* yang mempunyai efisiensi 20 % (Yulianto, 2011).

Rendahnya efisiensi konversi energi panas matahari menjadi energi listrik menyebabkan penggunaan *solar cell* hanya cocok untuk menjalankan sinyal

elektronik bertenaga kecil seperti radio, kalkulator, dan lain sebagainya. Berbagai penyempurnaan peralatan *solar cell* yang telah dilakukan hanya mampu menaikkan efisiensi sampai 27 %. Keadaan ini belum dapat digunakan untuk melayani kegiatan industri yang mengkonsumsi tenaga listrik dalam jumlah besar (Wardhana, 2004).

Solar cell yang baik harus terbuat dari material dengan koefisien absorpsi tinggi sehingga mampu menyerap sebagian besar cahaya untuk menciptakan pasangan *electron-hole*. Selain itu, material yang digunakan harus mempunyai *band gap* yang sesuai, artinya celah pita energi tidak boleh terlalu besar atau terlalu kecil. Jika *band gap* terlalu besar, maka sebagian besar cahaya akan melewati lapisan penyerap sehingga V_{oc} (tegangan sirkuit terbuka) menjadi tinggi dan J_{sc} atau I_{sc} (arus hubungan singkat) menjadi rendah. Jika *band gap* terlalu kecil, maka sebagian besar energi akan terbuang karena berubah menjadi energi panas. Untuk mendapatkan arus yang besar, maka kontak *solar cell* dengan resistansi harus diperhatikan. Semakin besar resistansi/beban yang diberikan dapat menurunkan arus yang dihasilkan oleh *solar cell*, karena sebagian besar dari pembawa muatan akan mengalir menuju perangkat beban luar (*outside load device*) (Astuti, 2011).

Teknologi *solar cell* pada generasi pertama terbuat dari silikon monokristalin dan polikristalin. *Solar cell* ini memiliki efisiensi yang cukup tinggi tetapi mahal dalam proses produksinya. *Solar cell* generasi kedua merupakan modifikasi dari *solar cell* generasi pertama yang dibuat dalam bentuk lapisan tipis (*thin film solar cell*). Biaya produksi yang diperlukan pada generasi kedua ini lebih

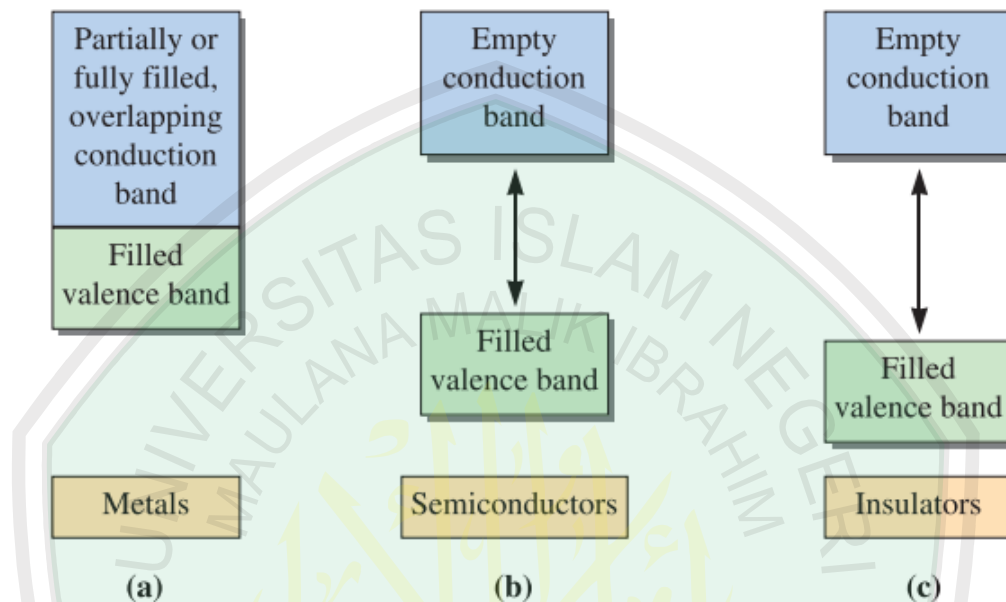
murah jika dibandingkan dengan generasi pertama, hanya saja efisiensinya lebih rendah. Generasi ketiga merupakan *solar cell* organik dan dibuat dengan tujuan untuk menghasilkan efisiensi yang tinggi dengan biaya murah (Ludin, 2014). Karena sel surya generasi ketiga ini terbuat dari bahan organik, maka akan mudah terdegradasi, sehingga performanya akan menurun terhadap waktu.

2.2 Material Penyusun *Solar Cell*

Bahan/material yang digunakan untuk membuat *solar cell* adalah semikonduktor. Semikonduktor diidentifikasi sebagai kelompok bahan yang unik karena memiliki konduktivitas yang cukup baik, lebih tinggi dari isolator, dan lebih rendah dari logam/konduktor (Enderlein dan Horing, 1999). Semikonduktor umumnya diklasifikasikan berdasarkan harga resistivitas listriknya pada suhu kamar, yaitu sekitar $10^{-2} \Omega\text{m}$ sampai $10^9 \Omega\text{m}$. Resistivitas listrik ini sangat dipengaruhi oleh suhu, cahaya, medan listrik dan magnet (Parno, 2006).

Berdasarkan teori pita, apabila atom-atom membentuk suatu molekul maka akan terjadi kombinasi linier dari orbital-orbital atom. Kombinasi linier tersebut menghasilkan orbital *bonding* (orbital ikatan) dan orbital *antibonding* (orbital anti ikatan) dengan tingkat energi yang berdekatan dan disebut sebagai pita energi. Pita energi ini sebenarnya terdiri dari dua bagian, yaitu separuh pita bagian bawah yang disebut sebagai pita *bonding* atau pita valensi (*valence band*) dan separuh pita bagian atas yang disebut sebagai pita *antibonding* atau pita konduksi (*conduction band*). Pada logam pita valensi dan pita konduksi yang terbentuk adalah menyatu, sedangkan pada semikonduktor pita valensi dan pita konduksi terpisah sebesar ΔE yang disebut energi ambang atau *band gap*. Dalam

keadaan absolut (suhu 0 K), pita valensi dianggap terisi penuh elektron sedangkan pita konduksinya kosong (Effendy, 2010).

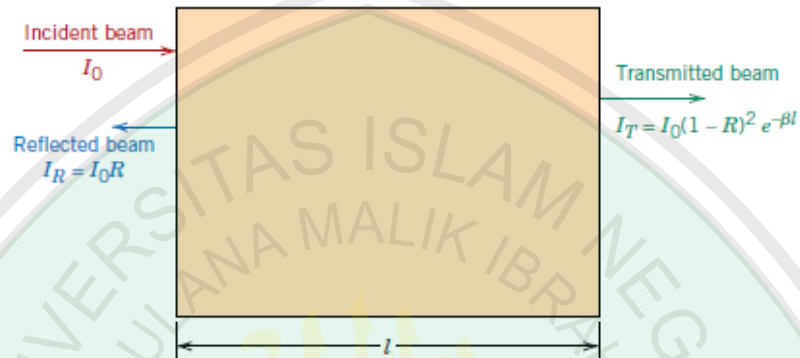


Gambar 2.1 Perbedaan Antara Energi *Gap*, (a) Bahan Konduktor, (b) Semikonduktor, dan (c) Isolator (Askeland, dkk. 2010)

Elektron pada pita valensi dapat tereksitasi ke pita konduksi apabila mendapatkan tambahan energi melebihi energi *gap* semikonduktor. Pada aplikasi sebagai *solar cell*, tambahan energi tersebut diperoleh dari cahaya matahari atau foton. Jika cahaya matahari diberikan pada lapisan semikonduktor, maka kemungkinan cahaya tersebut akan ditransmisikan, diabsorpsi, dan atau direfleksikan. Besarnya intensitas transmisi dari cahaya yang datang pada permukaan benda dengan ketebalan l diberikan oleh (Callister, 2014):

$$I_T = I_0(1 - R)^2 e^{-\beta l} \quad (2.1)$$

Dimana I_0 adalah intensitas cahaya datang dan β adalah koefisien absorpsi (mm^{-1}) yang merupakan karakteristik dari setiap material. Material dengan nilai β besar mempunyai kemampuan absorpsi yang tinggi.



Gambar 2.2 Radiasi Cahaya yang Direfleksikan, Diserap, dan Ditransmisikan oleh Bahan (Callister, 2014)

Besarnya energi yang digunakan untuk mengeksitasi elektron bergantung pada panjang gelombang dan intensitas cahaya yang diserap. Jika energi cahaya/foton yang diserap lebih besar daripada energi gap semikonduktor ($E = h\nu > E_g$), maka foton dapat berinteraksi dengan elektron valensi atom-atom semikonduktor hingga tereksitasi ke pita konduksi (Neamen, 2003). Radiasi cahaya yang dapat mengeksitasi elektron berada dalam spektrum cahaya tampak (*visible*) dan ultraviolet (UV). Sedangkan spektrum dalam daerah inframerah (2-100 μm) hanya menambah energi vibrasi pada molekul, dan spektrum dalam daerah inframerah jauh dan gelombang mikro (100 μm – 10 cm) hanya memberikan energi rotasi pada molekul (Day dan Underwood, 2002).

Sifat semikonduktor sangat dipengaruhi oleh tingkat ketidakmurnian bahan penyusunnya. Ketidakmurnian dalam semikonduktor dapat diperoleh

dengan menambah konsentrasi elektron sehingga menjadi tipe-n atau dengan menambahkan *hole* sehingga menjadi tipe-p (Parno, 2006).

2.2.1 Semikonduktor Tipe-n

Semikonduktor tipe-n merupakan semikonduktor dengan konsentrasi elektron yang lebih banyak daripada semikonduktor intrinsik. Semikonduktor tipe-n ini bisa didapat dengan mendopingkan atom pentavalen (grup VA) pada semikonduktor elementer seperti Si. Atom Si mempunyai empat elektron valensi yang masing-masing digunakan untuk ikatan kovalen dengan elektron valensi Si yang lainnya. Jika atom pentavalen (P, As, dan Sb) ditambahkan pada semikonduktor intrinsik Si, maka hanya ada empat dari lima elektron valensi atom pentavalen yang dapat berikatan kovalen dengan atom-atom Si, sedangkan elektron valensi yang lainnya terikat lemah pada atom pentavalen. Jika elektron yang terikat lemah mendapatkan sedikit tambahan energi, elektron ini akan dengan mudah berubah menjadi elektron bebas. Oleh karena atom pendoping memberikan sumbangan elektron pada semikonduktor, maka atom pendoping disebut sebagai atom donor (Parno, 2006).

Semikonduktor tipe-n tidak hanya terbuat dari hasil pendopingan atom pentavalen pada Silikon. Semikonduktor tipe-n juga dapat diperoleh dari bahan oksida logam seperti SnO₂. *Tin oxide* (SnO₂) merupakan salah satu material semikonduktor tipe-n dengan *band gap* 3,6-3,8 eV. Material ini sangat cocok untuk diaplikasikan sebagai elektroda konduktif pada *solar cell*, bahan sensor gas, *devais* fotokimia, dan baterai *lithium* (Naje, dkk. 2013).

2.2.2 Semikonduktor Tipe-p

Semikonduktor tipe-p didapat dengan mendopingkan atom trivalen (IIIA) pada semikonduktor elementer. Misalnya, kristal Si didoping dengan atom Ga. Karena atom Ga trivalen (mempunyai tiga elektron valensi), maka pada salah satu ikatan elektronnya terjadi *hole*. Jika pada semikonduktor diberi tambahan energi (medan listrik, suhu, atau cahaya), maka *hole* segera terisi oleh elektron yang ada di sekitarnya. Proses tersebut terus terjadi, sehingga *hole* dapat bergerak secara bebas ke seluruh bagian kristal. Karena cenderung menerima elektron untuk melengkapi ikatan tetrahedralnya, ketidakmurnian Ga menjadi ion negatif dan disebut akseptor (Parno, 2006). Semikonduktor tipe-p juga dapat diperoleh dari oksida logam seperti material Cu_2O . *Cuprous oxide* (Cu_2O) merupakan oksida logam tipe-p yang murah dan mudah diperoleh. Cu_2O ini mempunyai energi band gap 2,1 eV dan cocok untuk diaplikasikan sebagai *solar cell* (Ying, 2014).

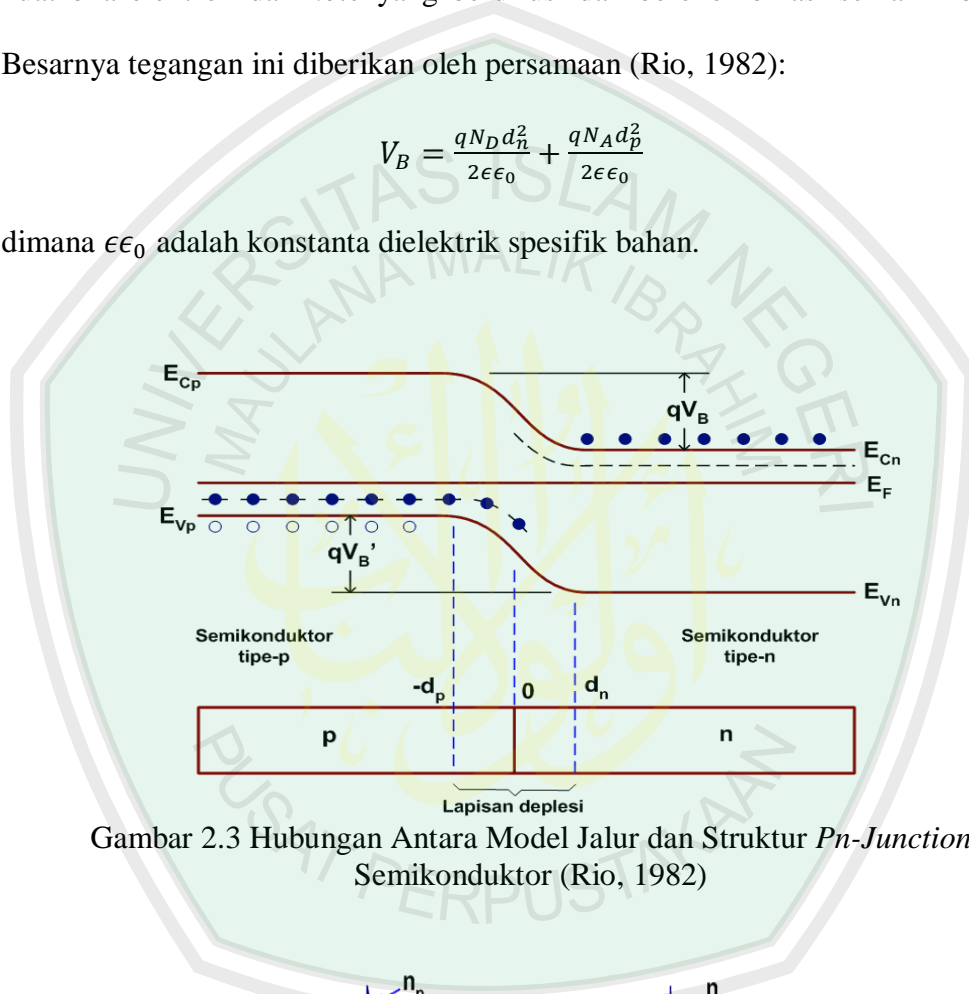
2.2.3 Pn-junction Semikonduktor

Solar cell terbuat dari sambungan semikonduktor tipe-p dan tipe-n. Sebelum kedua semikonduktor tersebut disambung, jumlah *hole* dalam pita valensi tipe-p lebih banyak daripada di pita valensi tipe-n, dan jumlah elektron dalam pita konduksi tipe-n lebih banyak jika dibandingkan dengan elektron pada pita konduksi tipe-p. Setelah keduanya disambung, maka pada pita valensi terjadi aliran (difusi) *hole* dari tipe-p ke tipe-n, sedangkan pada pita konduksi terjadi aliran elektron dari tipe-n ke tipe-p sampai terjadi keadaan setimbang. Proses difusi elektron dan *hole* menyebabkan perkembangan muatan positif pada tipe-n dan muatan negatif pada tipe-p membentuk lapisan deplesi (Effendy, 2010).

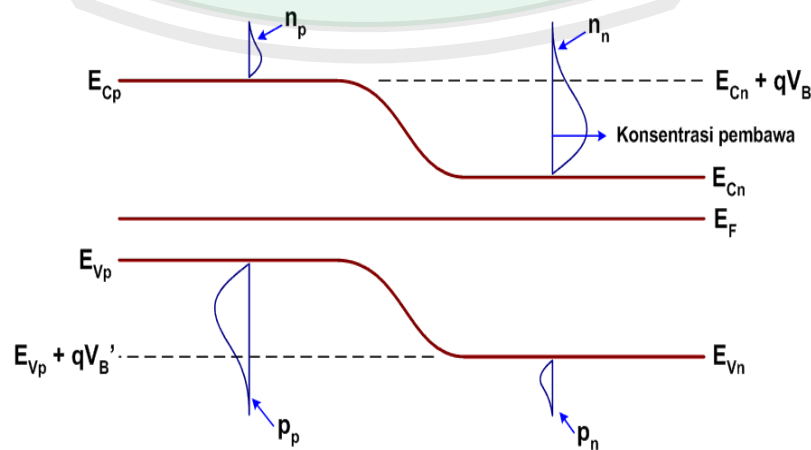
Dalam daerah deplesi timbul medan listrik yang disebut sebagai medan dalam atau medan *built-in* sedangkan beda potensial yang dihasilkan disebut tegangan difusi atau tegangan *barrier*. Medan listrik dan tegangan *barrier* akan semakin kuat bila elektron dan *hole* yang berdifusi dan berekombinasi semakin banyak. Besarnya tegangan ini diberikan oleh persamaan (Rio, 1982):

$$V_B = \frac{qN_D d_n^2}{2\epsilon\epsilon_0} + \frac{qN_A d_p^2}{2\epsilon\epsilon_0} \tag{2.2}$$

dimana $\epsilon\epsilon_0$ adalah konstanta dielektrik spesifik bahan.



Gambar 2.3 Hubungan Antara Model Jalur dan Struktur *Pn-Junction* Semikonduktor (Rio, 1982)

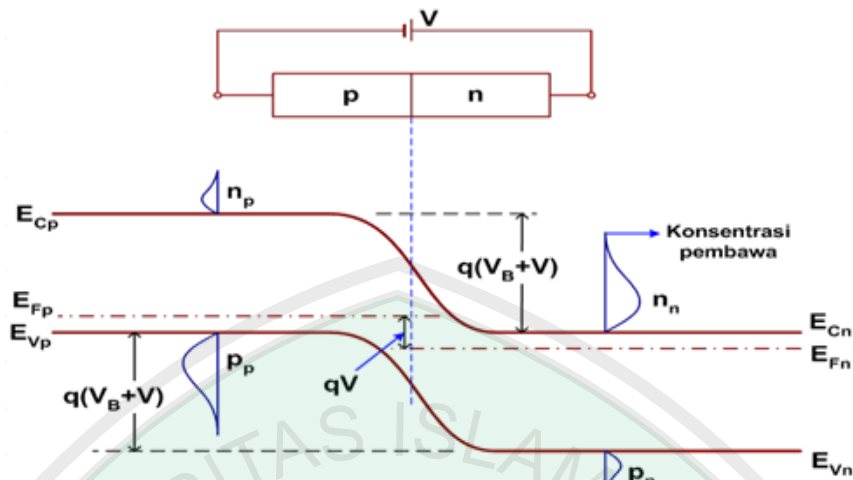


Gambar 2.4 Distribusi Pembawa dalam *Pn-junction* Semikonduktor (Rio, 1982)

Model *pn-junction* semikonduktor diperlihatkan pada gambar 2.3 dan gambar 2.4. Pada keadaan setimbang, tingkat energi fermi pada semikonduktor tipe-p dan tipe-n digambar datar atau segaris. Gambar 2.4 menunjukkan keadaan pembawa yang seimbang pada tingkatan energinya, sehingga tidak ada arus yang mengalir di dalam hubungan *pn-junction* semikonduktor. Hal ini disebabkan karena konsentrasi elektron pada tipe-p (n_p) sama dengan konsentrasi elektron pada semikonduktor tipe-n (n_n) yang mempunyai tingkat energi lebih tinggi daripada $E_{Cn} + qV_B$, dan konsentrasi *hole* pada tipe-n (p_n) juga sama dengan konsentrasi *hole* pada tipe-p (p_p) dengan tingkat energi lebih rendah daripada $E_{Vp} - qV_B$, sehingga tidak ada gradien konsentrasi pembawa yang cukup untuk melompati *barrier*.

2.3 Proses Konversi Energi Solar Cell

Elektron-elektron pada semikonduktor tipe-p dapat bergerak menuju tipe-n jika mendapatkan tambahan energi untuk melompati *barrier*. Dalam aplikasi sebagai *solar cell*, tambahan energi pada elektron diperoleh dari cahaya matahari. Pada waktu sel surya terkena sinar matahari maka elektron-elektron pada semikonduktor tipe-p mendapat tambahan energi termal sehingga dapat melewati sambungan pn (*pn-junction*) dan memasuki semikonduktor tipe-n. Apabila daya gerak elektron-elektron tersebut cukup besar, maka mereka dapat melewati kawat penghantar (menuju ke semikonduktor tipe-p kembali) sehingga terjadi arus listrik yang energinya dapat langsung dimanfaatkan atau disimpan dalam baterai (Effendy, 2010).



Gambar 2.5 Dioda Bias Mundur (Rio, 1982)

Arus yang mengalir pada *solar cell* sama dengan arus yang mengalir pada dioda yang diberi bias mundur. Karakteristik arus-tegangan pada dioda bias mundur diberikan oleh persamaan (Rio, 1982):

$$I = qA \left(\frac{D_p}{L_p} \cdot p_n + \frac{D_n}{L_n} \cdot n_p \right) (e^{-qV/kT} - 1) \quad (2.3)$$

Sedangkan karakteristik arus-tegangan pada dioda bias maju diberikan oleh persamaan:

$$I = qA \left(\frac{D_p}{L_p} \cdot p_n + \frac{D_n}{L_n} \cdot n_p \right) (e^{qV/kT} - 1) \quad (2.4)$$

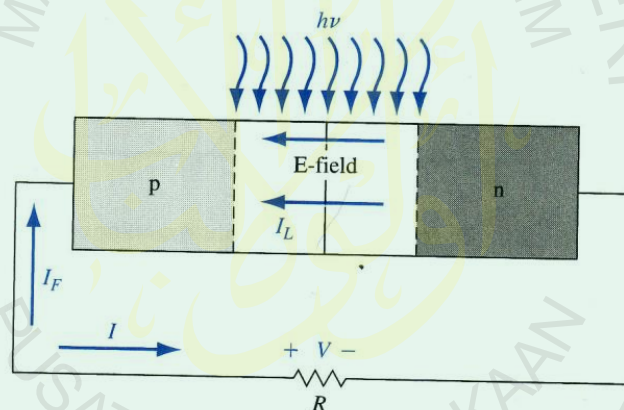
Pada dioda bias mundur, elektron bebas pada tipe-n (n_n) dan *hole* pada tipe-p (p_p) keduanya berada di bawah *barrier* karena V dianggap berharga besar (lihat gambar 2.5). Sedangkan elektron bebas pada tipe-p (n_p) menjadi lebih tinggi dari $q(V_B + V)$ sehingga elektron-elektron tersebut dapat mengalir melewati *junction* menuju ke pita konduksi tipe-n. Demikian juga dengan *hole* yang ada pada daerah tipe-n (p_n). Karena p_n mempunyai tingkat energi yang lebih rendah dari $q(V_B + V)$, maka *hole* juga mengalir menuju pita valensi tipe-p. Oleh karena

n_p dan p_n konsentrasinya sangat rendah, maka arus difusinya juga sangat rendah dan tidak bergantung pada V . Bila harga V sangat besar maka pada persamaan (2.3), suku $e^{-qV/kT}$ menjadi ≈ 0 , sehingga:

$$I = -qA \left(\frac{D_p}{L_p} \cdot p_n + \frac{D_n}{L_n} \cdot n_p \right) \quad (2.5)$$

Persamaan (2.5) merupakan arus jenuh mundur yang dinyatakan dengan I_s . Oleh karena itu, karakteristik hubungan semikonduktor tipe-p dan tipe-n dapat dinyatakan dengan:

$$I = I_F = I_s (e^{qV/kT} - 1) \quad (2.6)$$



Gambar 2.6 Pn-junction Solar Cell dengan Beban Resistor (Neamen, 2003)

Gambar 2.6 menunjukkan bahwa cahaya atau foton yang mengenai solar cell dapat menciptakan pasangan *electron-hole* dan menghasilkan *photocurrent* I_L dalam arah bias mundur. *Photocurrent* I_L ini dapat menghasilkan tegangan pada beban resistor, namun tegangan yang dihasilkan akan menurun karena adanya arus I_F yang berlawanan yang dihasilkan dari bias maju akibat pembebanan. Jadi arus yang mengalir dalam rangkaian solar cell tersebut adalah (Neamen, 2003):

$$I = I_L - I_F = I_L - I_S \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.7)$$

Terdapat dua hal yang penting untuk diketahui pada sifat listrik *solar cell*, yaitu kondisi *short-circuit current* (I_{sc}) dan *open-circuit voltage* (V_{oc}). Kondisi *short-circuit* Terjadi ketika $R = 0$ sehingga $V = 0$. Arus yang mengalir pada kasus seperti ini disebut sebagai *short-circuit current* (Neamen, 2003).

$$I = I_{sc} = I_L \quad (2.8)$$

Sedangkan kondisi *open-circuit* terjadi ketika $R \rightarrow \infty$, sehingga tidak ada arus yang mengalir pada rangkaian atau $I = 0$, dan tegangan yang dihasilkan disebut *open-circuit voltage*.

$$I = 0 = I_L - I_S \left[\exp\left(\frac{eV_{oc}}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.9)$$

Sehingga besarnya *open-circuit voltage* diberikan oleh:

$$V_{oc} = \frac{kT}{e} \ln\left(1 + \frac{I_L}{I_S}\right) = V_t \ln\left(1 + \frac{I_L}{I_S}\right) \quad (2.10)$$

Daya yang dihasilkan dari rangkaian *solar cell* seperti pada gambar 2.6 adalah:

$$P = I \cdot V = I_L \cdot V = I_L V - I_S \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] V \quad (2.11)$$

Daya maksimum (P_m) terjadi pada tegangan maksimum (V_m). Tegangan maksimum dapat diketahui jika $dP/dV = 0$. Sehingga:

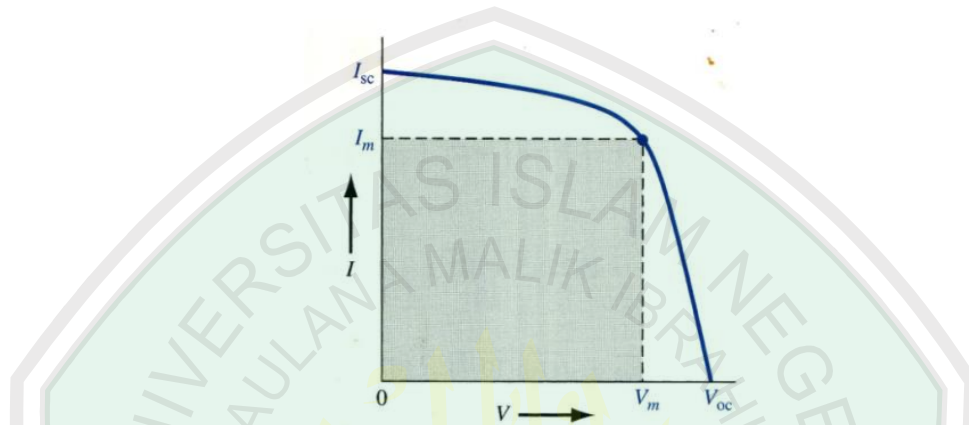
$$\frac{dP}{dV} = 0 = I_L - I_S \left[\exp\left(\frac{eV_m}{kT}\right) - 1 \right] - I_S V_m \left(\frac{e}{kT}\right) \exp\left(\frac{eV_m}{kT}\right) \quad (2.12)$$

dimana V_m adalah tegangan maksimum yang menghasilkan daya maksimum.

Persamaan tersebut juga dapat ditulis dalam bentuk berikut:

$$\left(1 + \frac{V_m}{V_t}\right) \exp\left(\frac{eV_m}{kT}\right) = 1 + \frac{I_L}{I_S} \quad (2.13)$$

Nilai V_m dapat ditentukan dengan *trial and error*. Gambar 2.7 menunjukkan daya maksimum yang mempunyai luasan dalam bentuk persegi panjang, dimana I_m adalah arus maksimum yang terjadi ketika $V = V_m$.



Gambar 2.7 Daya Maksimum dari Karakteristik I - V Solar cell (Neamen, 2003)

2.4 Efisiensi Solar Cell

Efisiensi dari *solar cell* dapat diketahui dengan rumus berikut (Ohajianya dan Abumere, 2013):

$$\eta = \frac{P_m}{E_1 A_c} \times 100\% \quad (2.14)$$

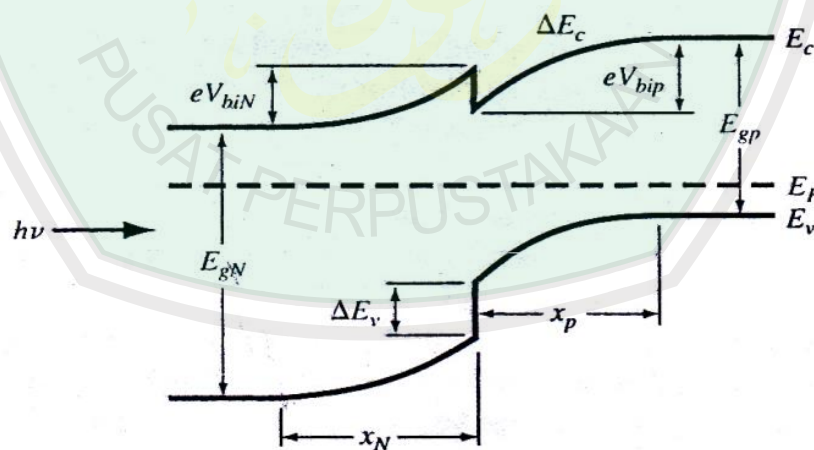
dan *fill factor* FF dari *solar cell* dapat diketahui dengan rumus berikut:

$$FF = \frac{P_m}{V_{oc} I_{sc}} \quad (2.15)$$

dimana P_m = daya maksimum, V_{oc} = *open circuit voltage*, I_{sc} = *short circuit current*, E_1 = radiasi yang masuk pada *solar cell* dan A_c = luasan permukaan *solar cell*.

2.5 Heterojunction Solar Cell

Heterojunction solar cell terbentuk dari dua semikonduktor dengan *band gap* yang berbeda. Diagram pita energi dari *heterojunction solar cell* diperlihatkan seperti pada gambar 2.8. Diasumsikan bahwa foton datang pada material yang mempunyai *band gap* lebar (*band gap* semikonduktor tipe-n E_{gN}). Pada keadaan ini, foton yang energinya lebih dari E_{gN} akan diabsorpsi. Sementara energi foton yang kurang dari E_{gN} diteruskan menuju semikonduktor tipe-p yang mempunyai *band gap* sebesar E_{gp} . Jika energi foton tersebut lebih dari E_{gp} maka foton akan diabsorpsi untuk mengeksitasi elektron sehingga tercipta pasangan *electron-hole*. *Heterjunction solar cell* memiliki karakteristik yang lebih baik daripada *homojunction solar cell* karena dapat menyerap foton/cahaya dengan baik pada panjang gelombang yang pendek (Neamen, 2003).



Gambar 2.8 Diagram Pita Energi Pn-heterojunction dalam Keadaan Kestimbangan Termal (Neamen, 2003)

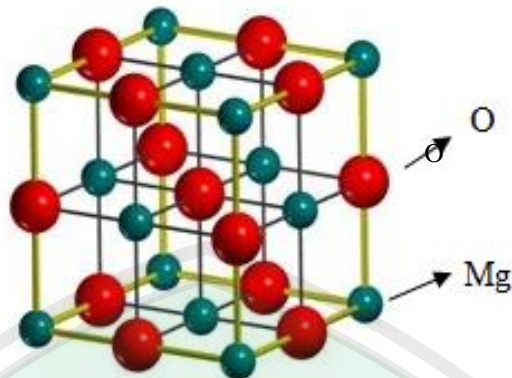
Heterojunction solar cell CdS/InP dengan kemampuan konversi energi yang tinggi dapat diperoleh dengan metode *vacuum evaporation*, *chemical vapor*

deposition, dan *close-spaced vapor transport* (CSVT). Efisiensi sebesar 12,5 % dari *heterojunction solar cell* n-CdS/p-InP telah dihasilkan dengan cara mendeposisikan lapisan CdS pada keadaan vakum diatas *single crystal* InP yang telah didoping dengan Cd (Bube, 1998). *Heterojunction solar cell* juga dapat diperoleh dengan mendeposisikan semikonduktor tipe-n yang mempunyai *band gap* yang cocok pada material Cu₂O (Abdu dan Musa, 2009). Penelitian yang telah dilakukan Fukuda dan Ichimura (2013) menunjukkan bahwa *solar cell* dengan struktur SnO₂/Cu₂O mampu menghasilkan efisiensi $6,6 \times 10^{-2} \%$, tegangan *open-circuit* (V_{oc}) 0,29 V, arus *short-circuit* (I_{sc}) $0,59 \text{ mA/cm}^2$, serta *fill factor* (FF) 0,39. Ievskaya, dkk (2015) juga telah meneliti *solar cell* dengan struktur Zn_{1-x}Mg_x/Cu₂O dan mampu menghasilkan efisiensi sebesar 2,2 %, V_{oc} 0,65 V, I_{sc} $6,9 \text{ mA/cm}^2$, serta FF sebesar 49,2 %.

2.6 Karakteristik Bahan

2.6.1 Komposit MgO-SnO₂

Komposit merupakan bahan yang terbentuk dari dua material atau lebih dengan sifat yang berbeda-beda, baik secara fisis maupun kimia. Ketika material-material tersebut dicampur, maka akan terjadi ikatan antar permukaan dan menghasilkan bahan baru yang mempunyai sifat berbeda, namun tidak menghilangkan sifat asli dari setiap materi penyusunnya. Pencampuran bahan seperti ini sering dilakukan untuk memperbaiki sifat suatu bahan, sehingga diperoleh bahan baru dengan sifat yang lebih baik dan cocok untuk aplikasi tertentu.



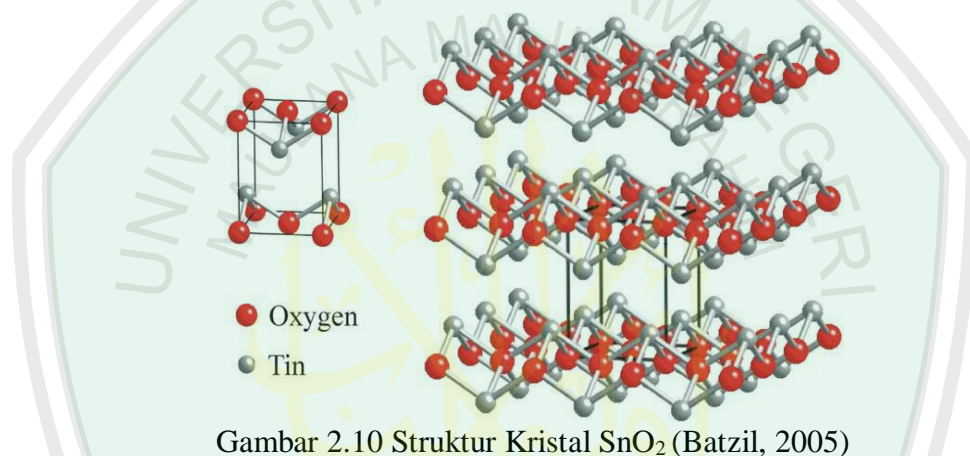
Gambar 2.9 Struktur Kristal MgO (Batzil, 2005)

SnO₂ dan MgO merupakan dua bahan dengan sifat yang berbeda dan akan menghasilkan sifat baru ketika dicampur membentuk komposit. Kristal Magnesium Oksida (MgO) berbentuk kubik dengan struktur kristal *rock salt*. Struktur kristal MgO digambarkan sebagai kisi FCC dari ion Mg, dengan ion O menempati semua lubang oktahedral, atau sebaliknya. MgO digunakan sebagai material optik, yang memiliki transparansi dari ketebalan 0,3 sampai 7 μm. Indeks refraksinya 1,74 pada 1 ketebalan μm. Kristal murni MgO dapat digunakan dalam *infrared optics* (Callister, 2007). MgO mempunyai titik leleh pada suhu 2852 °C (Considine, 2005).

Tabel 2.1 Karakteristik Magnesium Oksida (Considine, 2005)

Characteristic	Information
Colour	White
Structure	Cubic
Melting point	2852 °C (5166 °C; 3125 K)
Boiling point	3600 °C (6510 °F; 3870 K)
Density	3.58 g/cm ³
Indeks refraction	1.7355
Band gap	7.8 Ev

Tin oxide (SnO_2) merupakan salah satu material semikonduktor tipe-n yang mempunyai *band gap* 3,6-3,8 eV. Material ini sangat berpotensi untuk dimanfaatkan sebagai elektroda konduktif pada *solar cell*, bahan sensor gas, *devais* fotokonduktif dan fotokimia untuk LCD, dan baterai *lithium*. Nilai *optical band gap* nanopartikel SnO_2 pada temperatur 550 °C sekitar 4,3 eV jika dibandingkan dengan bulknya yang mempunyai nilai 3,78 eV (Naje, dkk. 2013).



Gambar 2.10 Struktur Kristal SnO_2 (Batzil, 2005)

Tabel 2.2 Karakteristik Tin Oksida (Considine, 2005)

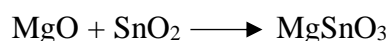
Characteristic	Information
Colour	White
Structure	Rutile
Resistance	$10^5 \Omega\text{m}$
Melting point	$>1900^\circ\text{C}$
Density	6.99 g/cm^3
Optical gap	3.9 eV
Band gap	3.7 eV

SnO_2 mempunyai *struktur rutile* tetragonal dengan dimensi sel $a = 474 \text{ pm}$ dan $c = 319 \text{ pm}$; kristal tunggal yang berbentuk kristal tunggal ini mempunyai nama *cassiterite*. *Cassiterite* adalah lebar *band gap* semikonduktor, dengan pita

valensi O penuh dari kulit 2p dan pita konduksi Sn kosong dari kulit 5s (Moulson dan Herbert, 2003).

Rahayu (2015) telah melakukan penelitian untuk mengetahui karakterisasi komposit MgO-SnO₂ yang dibuat dengan perbandingan 1:1 dan variasi suhu kalsinasi sebesar 600 °C, 650 °C, dan 700 °C. Dari penelitian ini diketahui bahwa konduktivitas listrik yang terbaik dihasilkan oleh komposit MgO-SnO₂ dengan suhu kalsinasi 700 °C, yaitu sebesar 471,32 (Ωm)⁻¹. Pada suhu tersebut, campuran MgO-SnO₂ menghasilkan beberapa fasa yaitu MgO, SnO₂, MgSnO₃, dan Mg₂SnO₄. *Magnesium stannate* (MgSnO₃) dan *magnesium orthostannate* (Mg₂SnO₄) merupakan dua fasa baru yang dimungkinkan dapat menambah semakin tingginya konduktivitas listrik yang dihasilkan. Dengan metode preparasi yang sama, Ningtyas (2015) telah melaporkan bahwa komposit MgO-SnO₂ yang dikalsinasi dengan suhu 700 °C mempunyai *indirect band gap* 4,39 eV dan dapat mengabsorpsi cahaya dengan maksimum pada rentang panjang gelombang 290-335 nm.

Fasa *metastannate* (MgSnO₃) muncul karena adanya reaksi antara MgO dengan SnO₂ ketika dipanaskan pada suhu kalsinasi 600 °C, dan dituliskan sebagaimana persamaan reaksi berikut (Huang, 2004):

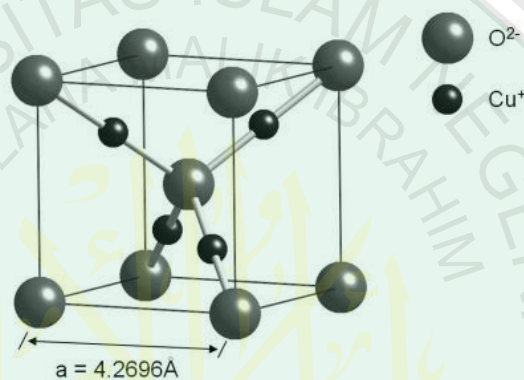


sedangkan fasa *ortho-magnesium stannate* (Mg₂SnO₄) muncul ketika komposisi MgO diperbesar, yaitu pada komposisi 5 MgO : 5 SnO₂ dan 7 MgO : 3 SnO₂. Hal ini karena MgO kurang stabil pada perlakuan panas, sehingga bereaksi kembali dengan MgSnO₃, ditunjukkan oleh persamaan reaksi berikut:



Jedynak (2011) menyatakan bahwa, dari perlakuan panas dan analisa komposisi fasa menunjukkan bahwa MgO dapat mengurangi *volatilitas* SnO₂ pada suhu tinggi yang disebabkan adanya fasa baru Mg₂SnO₄.

2.6.2 Tembaga Oksida (Cu₂O)



Gambar 2.11 Struktur *Cubic Cuprite* dari Cu₂O (Jeong, 2010)

Cu₂O merupakan material yang sangat cocok untuk diaplikasikan sebagai *solar cell* yang murah dan mempunyai efisiensi tinggi. Karakteristik yang menarik dari Cu₂O antara lain tidak beracun, mempunyai energi *gap* 2,1 eV yang cocok untuk diaplikasikan sebagai *solar cell*, murah dan mudah dalam fabrikasinya. Cu₂O mempunyai struktur kristal kubik dengan dengan kisi konstan 4,27 Å dan mempunyai cacat stoikiometri (*stoichiometry-defect*) sebagai semikonduktor tipe-p. Sebagai bahan dasar *solar cell*, menurut teori Cu₂O mampu menghasilkan efisiensi sekitar 20 % (Ying, 2014).

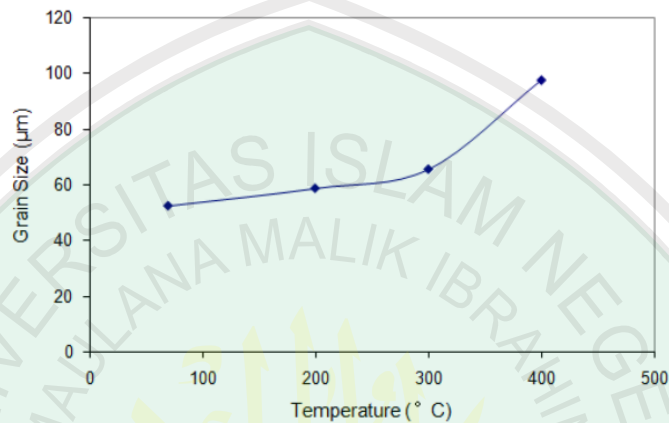
Tabel 2.3 Sifat Fundamental Cu₂O pada Temperatur Ruang (Jeong, 2010)

Properties	Value
Density (g/cm ³)	5.749 ~ 6.14 (Variation due to the presence of void in most synthetic materials)
Melting temperature (K)	1508
Crystal structure	Cuprite (Cubic) (space group : Pn3m – O _h ⁴)
Lattice constant (Å)	a = 4.2696
Band gap	2.17 (direct)
Hole Hall mobility (cm ² /V sec)	μ = 70
Dielectric constant	E(0) = 7.11; ε(∞) = 6.46

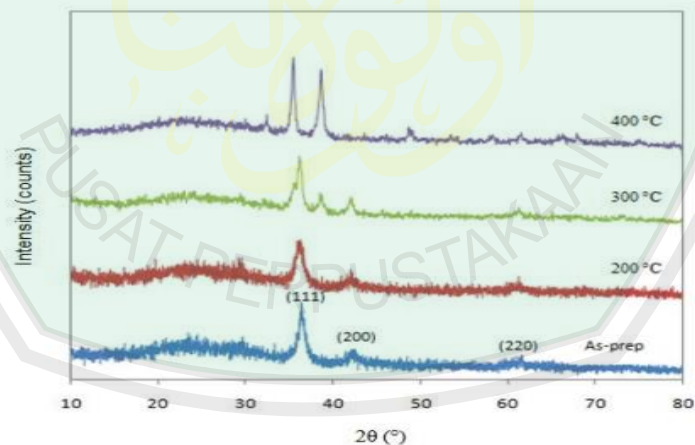
Cu₂O dapat diproduksi dengan metode *thermal oxidation*, *electrodeposition*, dan *sputtering* (Abdu dan Musa, 2009). Cu₂O juga dapat dihasilkan dengan metode *chemical bath deposition* (CBD). Metode CBD merupakan salah satu teknik deposisi lapisan tipis dari senyawa material seperti chalcogenida (*chalcogenides*), oksida (*oxides*) dan halida (*halides*). Metode CBD mempunyai keuntungan dalam hal biaya yang rendah, dapat dilakukan dalam daerah yang luas, dan temperatur yang dibutuhkan relatif rendah (Ying, 2014).

Timuda dan Maddu (2010) telah melakukan penelitian mengenai pelapisan semikonduktor Cu₂O di atas gelas preparat dengan metode CBD. Dari penelitian ini diketahui bahwa ketebalan lapisan memberikan pengaruh terhadap absorbansi, transmisi dan konstanta peredaman. Semakin tebal lapisan akan menyebabkan nilai absorbansi dan konstanta peredaman semakin besar, dan nilai transmisinya semakin kecil. Perlakuan variasi suhu *annealing* juga dapat merubah beberapa sifat optik yang dipelajari. Semakin panas suhu *annealing* menyebabkan nilai absorpsi, reflektansi, dan indeks bias semakin kecil, sedangkan nilai transmitansinya semakin besar. Pada penelitian ini juga diketahui bahwa nilai

band gap dari Cu_2O yang diperoleh dengan metode CBD adalah sekitar 2,35-2,42 eV. Nilai *band gap* dari Cu_2O ini sangat memungkinkan untuk diaplikasikan sebagai *solar cell*.



Gambar 4.3 Kurva Ukuran Butir Karena Pengaruh Suhu *Annealing* (Johan, dkk. 2011)



Gambar 4.4 Pola Hasil Pengujian XRD dengan Variasi Suhu *Annealing* Lapisan Cu_2O (Johan, dkk. 2011)

Menurut penelitian yang dilakukan oleh Johan, dkk. (2011), peningkatan suhu *annealing* dapat meningkatkan ukuran butir partikel Cu_2O dan dapat merubah fasa menjadi CuO pada suhu 300 °C keatas. Pada suhu 100 °C dan 200

°C fasa yang terbentuk adalah Cu₂O, sedangkan pada suhu 300 °C terdapat dua fasa yaitu Cu₂O dan CuO, dan pada suhu 400 °C fasa yang terbentuk adalah CuO.

2.7 Spektrofotometer UV-Vis

Spektroskopi UV-Vis merupakan alat untuk mengukur peredaman cahaya yang melewati sebuah sampel. Peredaman atau pengurangan dapat dihasilkan karena absorpsi, *scattering*, refleksi, atau interferensi. Kuantitas pengukuran yang akurat mengharuskan bahwa pengurangan hanya terjadi karena absorpsi oleh bahan (*analyte*), sehingga cara pengukuran dengan spektroskopi UV-Vis ini harus mengkompensasi mekanisme lain yang menyebabkan hilangnya sebagian cahaya pada saat melewati sampel (Kaufmann, 2003). Dari spektrum absorpsi dapat diketahui panjang gelombang dengan absorbansi maksimum dari suatu unsur atau senyawa.

Besarnya absorbansi berbanding lurus dengan jarak ketebalan dan konsentrasi larutan/sampel. Hubungan linier ini dikenal sebagai hukum Lambert-Beer (Kaufmann, 2003):

$$A = a \times b \times c \quad (2.16)$$

dimana A adalah absorbansi yang terukur, a adalah koefisien absorpsi, b adalah ketebalan sampel, dan c adalah konsentrasi *analyte*. Ketika bekerja di unit konsentrasi molaritas, hukum Lambert-Beer ditulis sebagai (Kaufmann, 2003):

$$A = \varepsilon \times b \times c \quad (2.17)$$

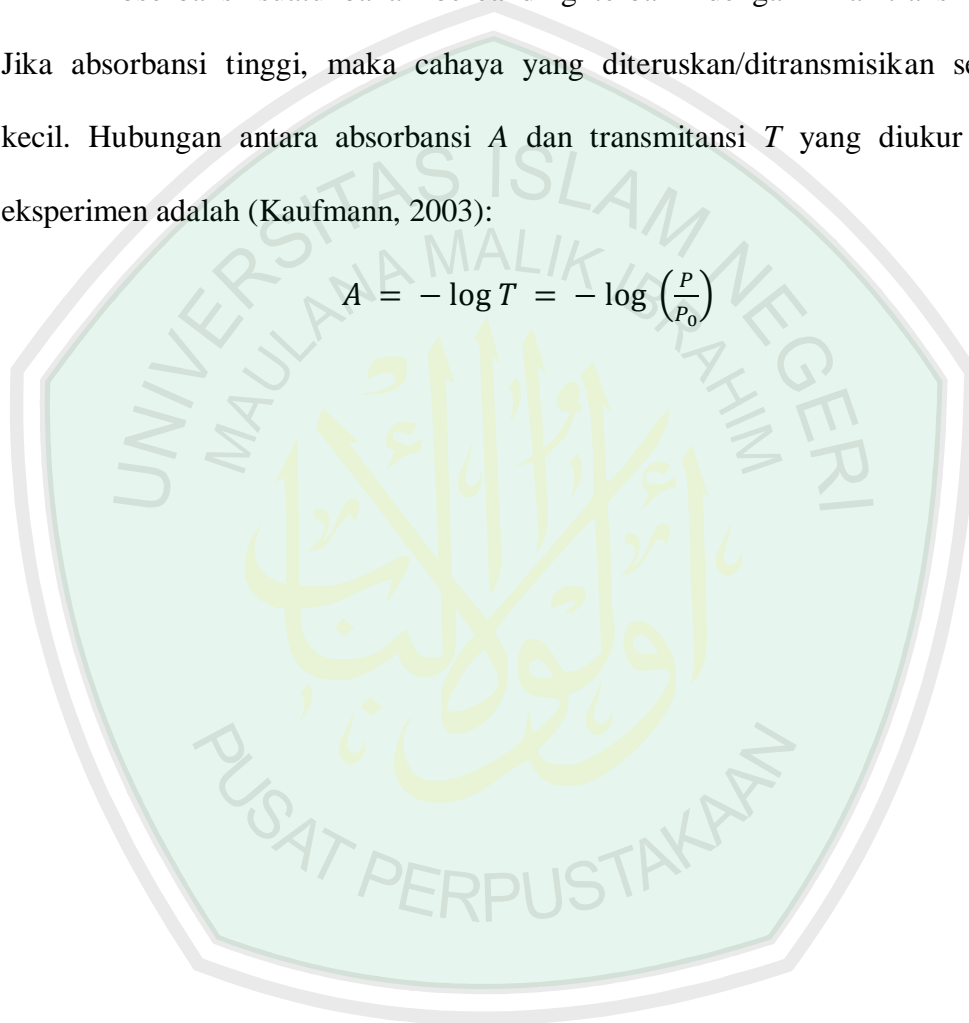
dimana ε adalah panjang gelombang yang bergantung pada koefisien absorptivitas molar dengan satuan kebalikan dari molaritas per cm dan b memiliki satuan cm.

Jika beberapa spesies bahan dalam sampel menyerap cahaya pada panjang gelombang tertentu, maka total absorbansinya menjadi (Kaufmann, 2003):

$$A = (\varepsilon_1 \times b \times c_1) + (\varepsilon_2 \times b \times c_2) + \dots \quad (2.18)$$

Absorbansi suatu bahan berbanding terbalik dengan nilai transmisinya. Jika absorbansi tinggi, maka cahaya yang diteruskan/ditransmisikan semakin kecil. Hubungan antara absorbansi A dan transmitansi T yang diukur secara eksperimen adalah (Kaufmann, 2003):

$$A = -\log T = -\log \left(\frac{P}{P_0} \right) \quad (2.19)$$



BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Jenis Penelitian

Penelitian ini bersifat eksperimen dan bertujuan untuk mengetahui karakteristik dari *solar cell* dengan kaca LCD/Cu₂O/MgO-SnO₂/Ag. Kaca LCD didapatkan dari kaca laptop bekas dan komposit MgO-SnO₂ diperoleh dari penelitian sebelumnya yang telah dilakukan oleh Rahayu (2015). Alat yang digunakan dalam karakterisasi meliputi spektrofotometer UV-Vis, multimeter digital dan rangkaian uji untuk mengetahui hambatan dan efisiensi *heterojunction solar cell*.

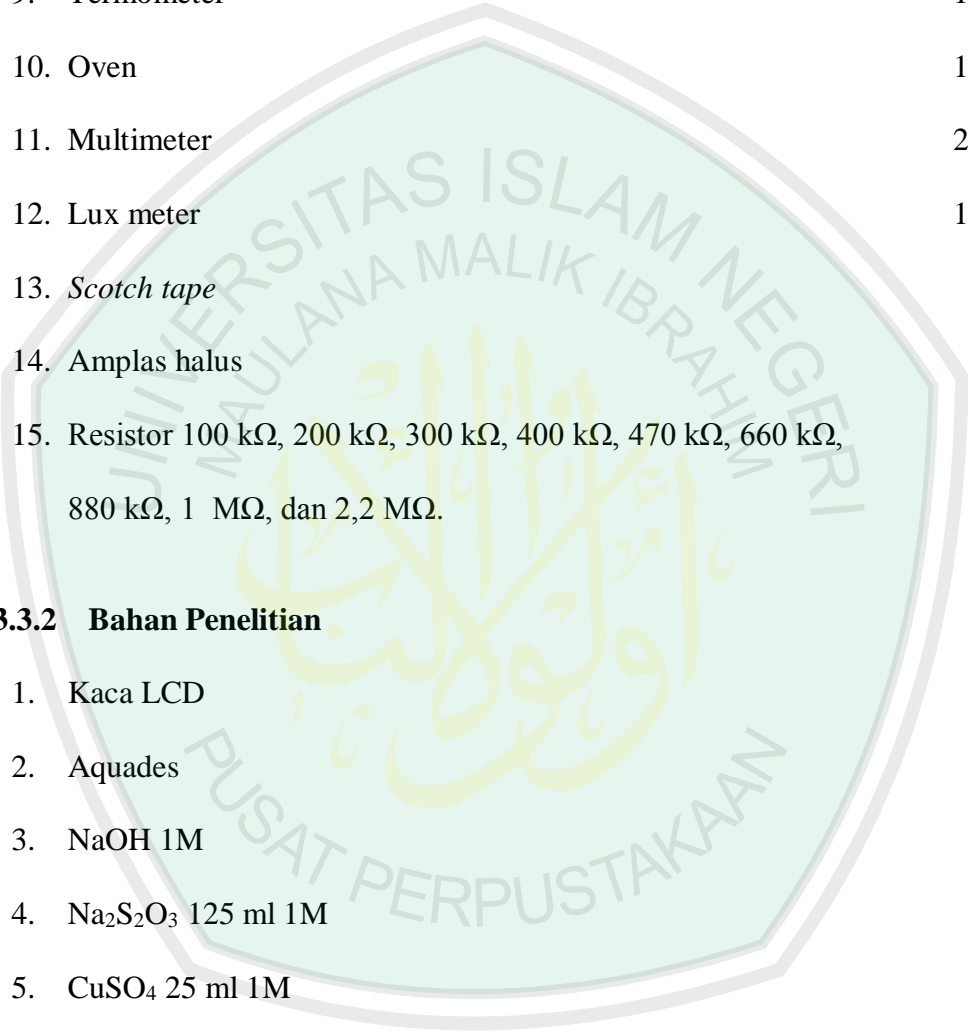
3.2 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada bulan Januari sampai Mei 2016, bertempat di Laboratorium Riset Material Jurusan Fisika UIN Maulana Malik Ibrahim Malang dan Laboratorium Fisika Zat Padat Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

3.3 Alat dan Bahan

3.3.1 Alat Penelitian

- | | |
|------------------------------|--------|
| 1. Mortar | 1 unit |
| 2. Spatula | 1 buah |
| 3. Pipet tetes | 1 buah |
| 4. <i>Ultrasonic cleaner</i> | 1 unit |
| 5. <i>Hot plate</i> | 1 unit |



6. <i>Magnetic stirrer</i>	1 unit
7. <i>Beaker glass</i>	2 buah
8. Spektrofotometer UV-Vis	1 unit
9. Termometer	1 buah
10. Oven	1 unit
11. Multimeter	2 buah
12. Lux meter	1 buah
13. <i>Scotch tape</i>	
14. Amplas halus	
15. Resistor 100 k Ω , 200 k Ω , 300 k Ω , 400 k Ω , 470 k Ω , 660 k Ω , 880 k Ω , 1 M Ω , dan 2,2 M Ω .	

3.3.2 Bahan Penelitian

1. Kaca LCD
2. Aquades
3. NaOH 1M
4. Na₂S₂O₃ 125 ml 1M
5. CuSO₄ 25 ml 1M
6. Serbuk komposit MgO-SnO₂
7. Polivinil Alkohol (PVA)
8. Perak cair (Ag) / silver konduktif

3.4 Prosedur Preparasi Sampel

3.4.1 Pembersihan Kaca LCD

Kaca LCD laptop bekas berfungsi sebagai kaca konduktif. Kaca tersebut harus dibersihkan agar lebih transparan dan menghilangkan kotoran yang dapat menghambat pertumbuhan lapisan Cu_2O pada saat proses deposisi. Langkah pembersihan kaca LCD adalah sebagai berikut:

1. Kaca LCD dipotong dengan ukuran sekitar 2 cm x 2 cm.
2. Lapisan gelap pada kaca LCD dibersihkan menggunakan amplas sehingga didapatkan substrat ITO atau TCO (*Transparance Conductive Oxide*) yang lebih transparan sebagai lapisan konduktif pada kaca LCD.
3. Kaca LCD yang telah diampas kemudian dicuci menggunakan *ultrasonic cleaner* selama 15 menit kemudian dibilas menggunakan tisu dan dikeringkan pada udara terbuka.

3.4.2 Pembuatan Larutan

Larutan yang digunakan ada dua, yaitu NaOH dengan suhu 70 °C yang disebut larutan A, dan larutan kompleks tembaga tiosulfat ($3\text{Cu}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) yang disebut sebagai larutan B. Kedua larutan ini digunakan untuk proses deposisi lapisan Cu_2O .

a) Pembuatan Larutan A

1. Dimasukkan larutan NaOH 1M sebanyak 100 mL ke dalam *beaker glass*.
2. Larutan NaOH dipanaskan pada suhu 70 °C dan dijaga agar suhunya tetap konstan.

b) Pembuatan Larutan B

- 1) Natrium tiosulfat ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) sebanyak 9,75 gram dilarutkan menggunakan aquades sebanyak 125 mL.
- 2) Tembaga sulfat (CuSO_4) sebanyak 2,175 gram dilarutkan menggunakan aquades sebanyak 25 mL.
- 3) Larutan natrium tiosulfat ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) yang telah terbentuk dicampur kedalam larutan tembaga sulfat (CuSO_4).
- 4) Hasil dari pencampuran larutan natrium tiosulfat dan larutan tembaga sulfat diencerkan dengan aquades sebanyak 250 mL.
- 5) Larutan yang telah diencerkan kemudian dibagi menjadi dua dan digunakan untuk proses deposisi Cu_2O .

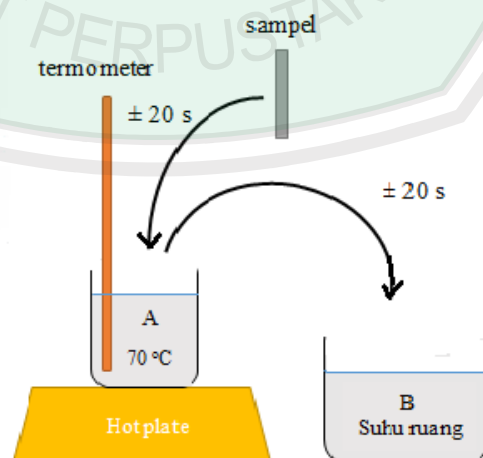
3.4.3 Proses Pendeposisian Cu_2O

1. Bagian permukaan TCO dilapisi dengan *scotch tape* seperti pada gambar 3.1. Pelapisan dengan *scotch tape* ini dilakukan dengan tujuan untuk menutupi bagian-bagian substrat TCO yang tidak diperlukan.
2. Substrat TCO yang telah dilapisi *scotch tape* dimasukkan ke dalam larutan A selama ± 20 detik.
3. Substrat TCO yang telah dimasukkan ke dalam larutan A kemudian langsung dimasukkan ke dalam larutan B selama ± 20 detik. Proses pencelupan substrat TCO dari larutan A ke dalam larutan B harus dilakukan dengan segera (tanpa jeda waktu). Dengan melakukan langkah ini berarti 1 siklus pencelupan telah dilakukan.

4. Siklus pencelupan diulangi sebanyak 20 kali. Dimana setiap 10 kali siklus pencelupan, ketebalan lapisan Cu_2O bertambah $\approx 0,15 \mu\text{m}$ (Maddu, 2010). Proses pencelupan ini merupakan inti dari *chemical bath deposition* (CBD) dan diilustrasikan seperti pada gambar 3.2.
5. Lapisan Cu_2O yang terbentuk dari proses CBD dikeringkan pada udara terbuka.
6. Lapisan *scotch tape* yang menempel pada substrat TCO dilepas.
7. Lapisan Cu_2O divariasikan dengan tanpa *annealing*, *annealing* dengan suhu 100°C , 150°C , 200°C , dan 250°C secara berurutan.



Gambar 3.1 Pelapisan *Scotch Tape* pada Permukaan Lapisan TCO Kaca LCD



Gambar 3.2 Proses Pendeposisian Lapisan Cu_2O

3.4.4 Pembuatan Pasta Komposit MgO-SnO₂

1. Serbuk komposit MgO-SnO₂ digerus menggunakan mortar hingga halus. Serbuk MgO-SnO₂ ini diperoleh dari penelitian sebelumnya yang telah dilakukan oleh Rahayu (2015) dengan perbandingan 1:1 dan suhu kalsinasi 700 °C selama 1 jam.
2. PVA sebanyak 0,5 gram dilarutkan ke dalam aquades sebanyak 20 mL.
3. Serbuk halus MgO-SnO₂ sebanyak 0,56 gram dicampur dengan larutan PVA sebanyak 30 tetes dan digerus hingga homogen membentuk pasta.

3.4.5 Pelapisan MgO-SnO₂ pada Lapisan Cu₂O

1. *Scotch tape* dipasang pada sisi-sisi lapisan Cu₂O. *Scotch tape* digunakan untuk mengatur ketebalan komposit MgO-SnO₂ yang akan dideposisikan secara *doctor blade* di atas lapisan Cu₂O. *Scotch tape* mempunyai ketebalan 30 µm.
2. Pasta MgO-SnO₂ ditetaskan di atas lapisan Cu₂O yang telah dilapisi dengan *scotch tape*.
3. Pasta MgO-SnO₂ yang telah ditetaskan kemudian diratakan menggunakan kaca preparat, sehingga diperoleh lapisan Cu₂O/MgO-SnO₂ yang sesuai dengan ketebalan *scotch tape*.
4. Lapisan MgO-SnO₂ yang terbentuk dikeringkan pada udara terbuka selama 15 menit.
5. *Scotch tape* dilepas dari substrat TCO.

6. Dipanaskan lapisan MgO-SnO₂ dengan temperatur 100 °C selama 20 menit menggunakan oven. Pemanasan ini bertujuan untuk menghilangkan *solvent* yang terdapat pada lapisan MgO-SnO₂.

3.4.6 Pelapisan Elektroda Perak (Ag)

1. *Scotch tape* dilapiskan kembali pada sisi-sisi lapisan MgO-SnO₂.
2. Perak cair (Ag) dilapiskan di atas lapisan MgO-SnO₂.
3. Lapisan Ag yang terbentuk dikeringkan pada udara bebas.
4. *Scotch tape* dilepas dari substrat TCO.
5. Lapisan Ag dipanaskan dengan suhu 120 °C selama 10 menit menggunakan oven. Pemanasan ini bertujuan untuk menghilangkan *solvent* dan memperbaiki konduktivitas lapisan Ag.

3.5 Pengujian Karakteristik Solar Cell

3.5.1 Pengujian Absorbansi Lapisan Cu₂O/MgO-SnO₂

1. Kaca LCD dipotong dengan ukuran sekitar 2 cm × 0,8 cm. Ukuran tersebut menyesuaikan dengan lebar kuvet pada alat spektrofotometer UV-Vis.
2. Substrat TCO pada kaca LCD dilapisi Cu₂O dan MgO-SnO₂. Lapisan tersebut diperoleh dengan proses yang sama pada saat pendeposisian Cu₂O dan pelapisan MgO-SnO₂.
3. Substrat TCO (tanpa lapisan Cu₂O dan MgO-SnO₂) dimasukkan ke dalam spektrofotometer UV-Vis sebagai *reference*.
4. Substrat TCO yang telah dilapisi Cu₂O dan MgO-SnO₂ dimasukkan ke dalam spektrofotometer UV-Vis sebagai sampel uji.

5. Spektrofotometer UV-Vis dioperasikan dengan panjang gelombang 200 nm sampai 1100 nm. Data yang keluar dari pengujian ini adalah nilai absorbansi terhadap fungsi panjang gelombang.



Gambar 3.3 Alat Spektrofotometer GENESYS 10S UV-Vis

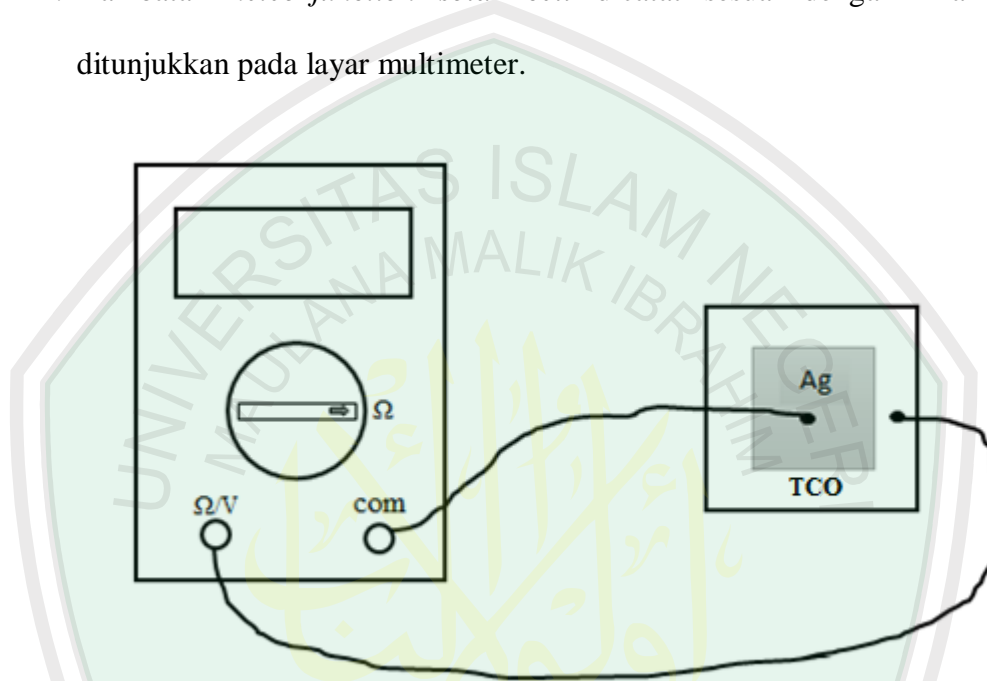
3.5.2 Pengujian Hambatan *Heterojunction Solar Cell*

Pengujian hambatan *heterojunction solar cell* dilakukan seperti menguji hambatan dioda pada bias maju dan bias mundur. Langkah-langkah dari pengujian ini adalah sebagai berikut:

- a) Pengukuran hambatan *heterojunction solar cell* pada bias maju
 1. Kenop faktor pengali multimeter diputar ke simbol ohmmeter (Ω).
 2. Lapisan Ag dihubungkan ke com (*ground*) multimeter dan bagian lapisan TCO atau ITO pada kaca LCD dihubungkan ke probe positif (ke mode Ω) multimeter.
 3. Hambatan *heterojunction solar cell* dicatat sesuai dengan nilai yang ditunjukkan pada layar multimeter.

b) Pengukuran hambatan *heterojunction solar cell* pada bias mundur

1. Lapisan Ag dihubungkan ke probe positif (mode Ω) multimeter, sedangkan bagian lapisan TCO dihubungkan ke com (*ground*) multimeter.
2. Hambatan *heterojunction solar cell* dicatat sesuai dengan nilai yang ditunjukkan pada layar multimeter.

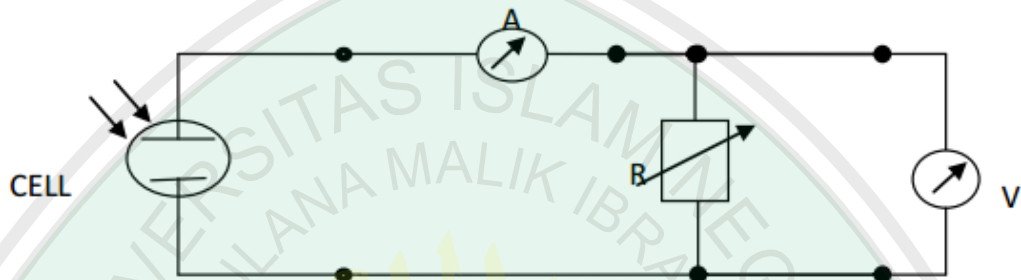


Gambar 3.4 Pengujian Hambatan *Heterojunction Solar Cell*

3.5.3 Pengujian Efisiensi *Solar Cell*

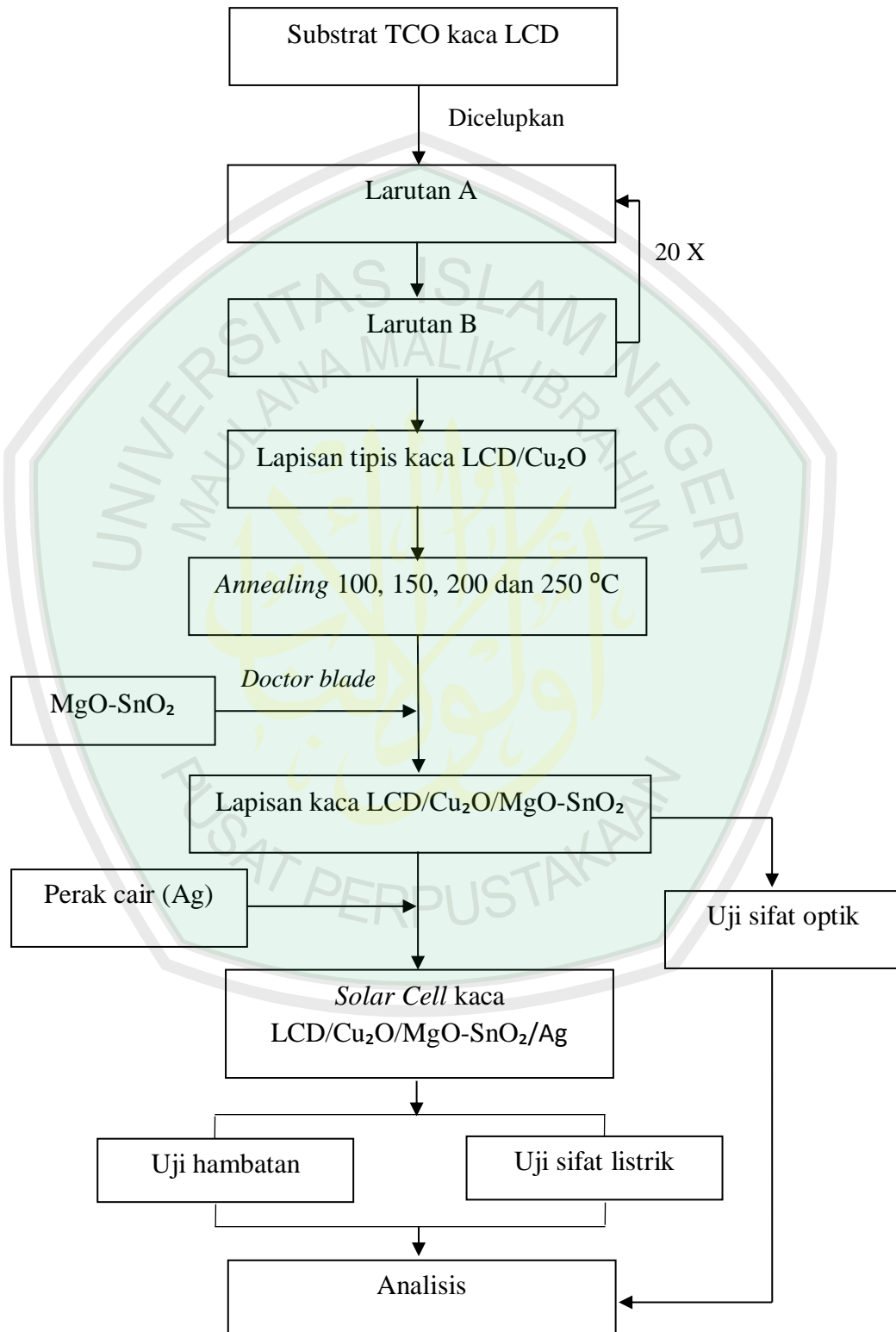
1. Alat uji *solar cell* dirangkai sesuai dengan gambar 3.5.
2. *Solar cell* kaca LCD/Cu₂O/MgO-SnO₂/Ag disinari dengan lampu halogen.
Lampu halogen ini digunakan sebagai pengganti dari sinar matahari.
3. Intensitas cahaya lampu halogen diukur menggunakan lux meter.
4. Beban/resistor pada rangkaian uji divariasikan dengan nilai 0 Ω , 100 k Ω , 200 k Ω , 300 k Ω , 400 k Ω , 470 k Ω , 660 k Ω , 880 k Ω , 1 M Ω , 2,2 M Ω dan ∞ .
5. Nilai tegangan (*V*) dan arus (*I*) dicatat sesuai dengan yang dihasilkan pada layar multimeter.

6. Daya *heterojunction solar cell* dihitung dengan mengalikan tegangan (V) dengan arus (I).
7. Efisiensi *heterojunction solar cell* (η) dihitung menggunakan persamaan (2.14)



Gambar 3.5 Rangkaian Uji *Solar Cell* (Ohajianya dan Abumere, 2013)

3.6 Diagram Alir



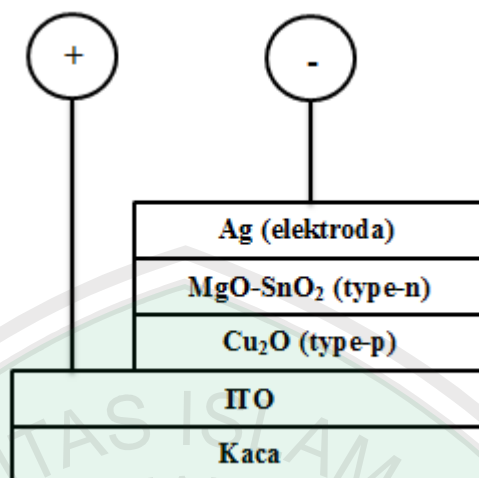
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Penelitian

Solar cell yang dibuat dalam penelitian ini menggunakan bahan semikonduktor oksida logam, yaitu Cu_2O dan komposit MgO-SnO_2 . Kedua bahan tersebut mempunyai energi *gap* yang berbeda sehingga sampel yang dihasilkan disebut *heterojunction solar cell*. Untuk mengetahui karakteristik dari sampel yang dihasilkan, maka dilakukan pengujian absorbansi, hambatan dan efisiensi (η) *heterojunction solar cell*.

4.1.1 Sampel *Heterojunction Solar Cell*

Sampel *solar cell* dibuat dengan struktur kaca LCD/ $\text{Cu}_2\text{O/MgO-SnO}_2/\text{Ag}$ dan mempunyai luasan sebesar 1,5 cm x 1,5 cm. Kaca LCD yang digunakan berasal dari laptop bekas yang telah dibersihkan dan mempunyai konduktivitas tinggi dengan hambatan sekitar 60-200 Ω . Lapisan *pn-heterojunction* $\text{Cu}_2\text{O/MgO-SnO}_2$ merupakan material aktif yang akan menciptakan pasangan *electron-hole* ketika mendapat sinar matahari. *Hole* yang tercipta kemudian dialirkan melalui lapisan konduktif pada kaca LCD, sedangkan elektron bebas dialirkan melalui Ag menuju rangkaian luar. Aliran *hole* dan elektron dapat dimanfaatkan secara langsung untuk berbagai perangkat elektronik.



Gambar 4.1 Struktur Lapisan *Heterojunction Solar Cell*

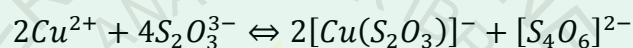
a) Lapisan Cu_2O

Lapisan tipis semikonduktor tipe-p Cu_2O ditumbuhkan menggunakan metode *chemical bath deposition* (CBD). CBD merupakan salah satu metode yang mudah dan murah karena dapat dilakukan dalam suhu yang relatif rendah. Proses deposisi kimia ini dilakukan dengan cara mencelupkan kaca LCD ke dalam larutan A dan larutan B secara berurutan, masing-masing selama 20 menit dan diulangi sebanyak 20 kali. Pencelupan dilakukan dengan tanpa jeda waktu. Sebelum proses deposisi, kaca LCD harus dibersihkan terlebih dahulu yaitu dengan cara mengamplas bagian hitam LCD kemudian dimasukkan ke dalam *ultrasonic cleaner* selama 60 menit. Pengamplasan dilakukan untuk meningkatkan transparansi kaca LCD, namun tidak sampai menghilangkan lapisan konduktifnya.

Larutan A terbuat dari 40 gram NaOH (Merck KgaA 64271, Germany) yang dilarutkan ke dalam aquades sebanyak 100 mL dan dipanaskan dengan suhu 70 °C. Suhu tersebut dijaga konstan selama proses pencelupan. Sedangkan Larutan B merupakan larutan kompleks tembaga tiosulfat yang dibuat dengan

mencampurkan 125 mL natrium tiosulfat ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) (Merck KgaA 64271, Germany) 1 M ke dalam 25 mL larutan tembaga (II) sulfat pentahidrat (CuSO_4) (Merck KgaA 64271, Germany) 1 M sampai membentuk larutan yang tidak berwarna (bening). Hasil dari campuran tersebut diencerkan dengan 250 mL aquades kemudian dibagi menjadi dua untuk proses pencelupan.

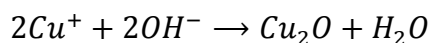
Beningnya campuran larutan natrium tiosulfat dan tembaga sulfat disebabkan karena adanya reaksi sebagai berikut (Ravichandran, dkk. 2014):



Dari reaksi tersebut, kemudian ion Cu (I) akan terbentuk dari kesetimbangan disosiasi (penguraian).



Ketika kaca LCD dimasukkan ke dalam larutan A, maka ion OH^- dari NaOH akan menempel pada permukaan ITO membentuk lapisan ionik. Jika lapisan ini dimasukkan ke dalam larutan B, maka lapisan ionik tersebut akan bereaksi dengan ion Cu^+ membentuk lapisan Cu_2O . Reaksinya adalah sebagai berikut (Ravichandran, dkk. 2014):



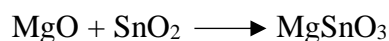
Lapisan Cu_2O dibuat dengan ukuran 1,5 cm x 1,5 cm dan ketebalannya bergantung pada banyaknya siklus pencelupan, dimana setiap 10 kali siklus ketebalan lapisan bertambah $\approx 0,15 \mu\text{m}$ (Timuda dan Maddu, 2010). Oleh karena siklus pencelupan pada penelitian ini dilakukan sebanyak 20 kali, maka ketebalan

lapisan Cu_2O yang dihasilkan sekitar $\approx 0,3 \mu\text{m}$. Lapisan Cu_2O yang didapat dari proses CBD kemudian dilakukan *annealing* dengan suhu ruang, suhu 100°C , 150°C , 200°C , dan 250°C selama 1 jam. Variasi suhu *annealing* dapat merubah sifat optik dari lapisan $\text{Cu}_2\text{O}/\text{MgO}-\text{SnO}_2$ sehingga efisiensi dari *solar cell* juga berubah.

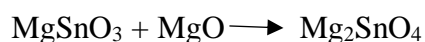
b) Lapisan Komposit $\text{MgO}-\text{SnO}_2$

Lapisan komposit $\text{MgO}-\text{SnO}_2$ digunakan sebagai semikonduktor tipe-n. Komposit $\text{MgO}-\text{SnO}_2$ diperoleh dari penelitian sebelumnya yang telah dilakukan oleh Rahayu (2015) dengan cara mencampurkan MgO (Merck KgA 64271, Germany) dan SnO_2 (Merck KgA 99 %) dengan perbandingan 1:1 dan suhu kalsinasi 700°C . Fasa yang dihasilkan dari proses pembuatan komposit tersebut adalah MgO , SnO_2 , MgSnO_3 (*magnesium stannate*) dan Mg_2SnO_4 (*magnesium orthostannate*). Komposit $\text{MgO}-\text{SnO}_2$ yang dihasilkan mempunyai konduktivitas listrik sebesar $471,32 (\Omega\text{m})^{-1}$ (Rahayu, 2015) dan mempunyai nilai *band gap* sebesar $4,39 \text{ eV}$ (Ningtyas, 2015).

MgSnO_3 (*magnesium stannate*) muncul karena pada temperatur 700°C sebagian kecil dari SnO_2 bereaksi dengan MgO .



Sedangkan fasa Mg_2SnO_4 (*magnesium orthostannate*) dihasilkan ketika partikel *magnesium stannate* bereaksi kembali dengan MgO .



Lapisan komposit MgO-SnO₂ diperoleh secara *doctor blade* dari pasta MgO-SnO₂ dengan menggunakan *scotch tape* sebagai pengatur ketebalan, yaitu sekitar 30 μm. Pasta MgO-SnO₂ dibuat dari campuran serbuk MgO-SnO₂ sebanyak 0,56 gram dan 30 tetes larutan PVA yang telah digerus dengan mortar hingga homogen. Larutan PVA berfungsi sebagai perekat serbuk komposit dan dibuat dengan mencampurkan 0,5 gram PVA teknis dalam 20 mL aquades menggunakan *magnetic stirrer* (cimarec) pada suhu 80 °C. Semikonduktor komposit MgO-SnO₂ yang dihasilkan dari proses *doctor blade* kemudian dipanaskan dengan suhu 100 °C selama 20 menit untuk menghilangkan *solvent* yang ada pada lapisan.

c) Lapisan Perak Konduktif (Ag)

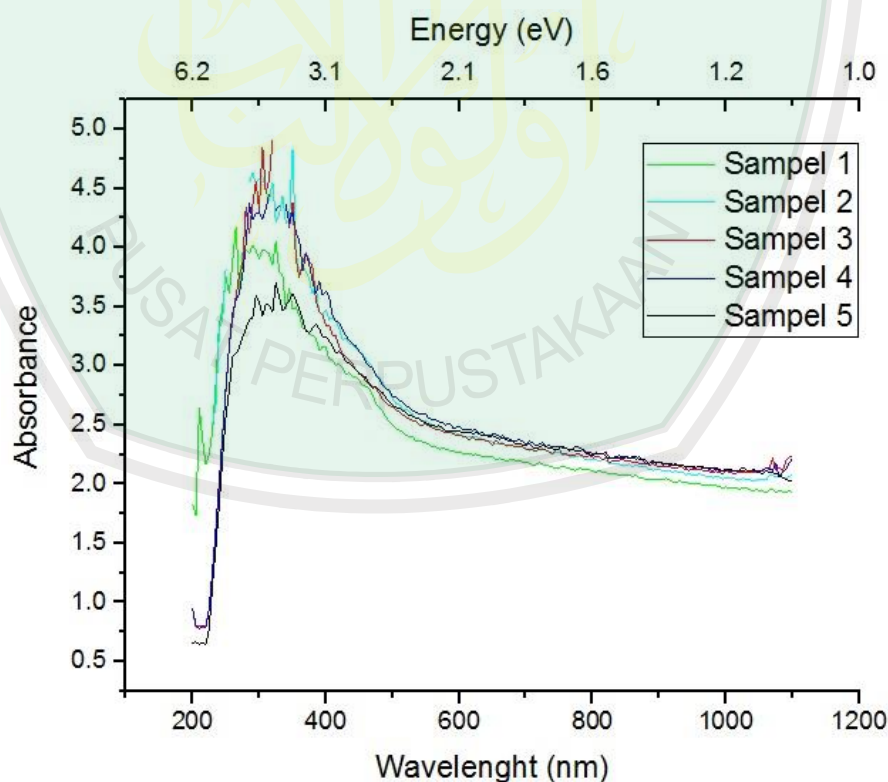
Lapisan Ag mempunyai konduktivitas yang lebih tinggi daripada lapisan MgO-SnO₂. Lapisan ini dibutuhkan sebagai penghantar elektron bebas yang terkumpul pada permukaan semikonduktor tipe-n MgO-SnO₂. Perak konduktif (HK Wentworth Ltd, Kingsburty Park) dilapiskan secara *doctor blade* dan dipanaskan dengan suhu 120 °C. Pemanasan berfungsi untuk menghilangkan *solvent* yang ada pada perak dan sekaligus untuk memperbaiki konduktivitas lapisan yang dihasilkan.

4.1.2 Pengujian Solar Cell

a) Sifat Absorbansi Lapisan Cu₂O/MgO-SnO₂

Pengujian sifat optik *pn-heterojunction* Cu₂O/MgO-SnO₂ dilakukan di Laboratorium Zat Padat Jurusan Fisika Institut Teknologi Sepuluh

Nopember Surabaya menggunakan spektrofotometer UV-Vis (Genesys 10S UV-Vis v4.003 2L9P286007) dengan panjang gelombang 200-1100 nm. Alat tersebut merupakan spektrofotometer *double beam*, sehingga antara sampel dan *reference* dapat diuji secara langsung. Dalam karakterisasi ini, sampel MgO-SnO₂ dilapiskan pada kaca LCD laptop yang telah dibersihkan, dan *reference* yang digunakan juga dari kaca LCD yang sama. Data yang dihasilkan dari pengujian adalah hubungan antara absorbansi (A) dengan panjang gelombang (λ). Absorbansi merupakan nilai dari besarnya cahaya yang diserap oleh benda. Nilai absorbansi perlu diketahui karena berkaitan dengan kemampuan lapisan Cu₂O/MgO-SnO₂ dalam menciptakan pasangan *electron-hole*.

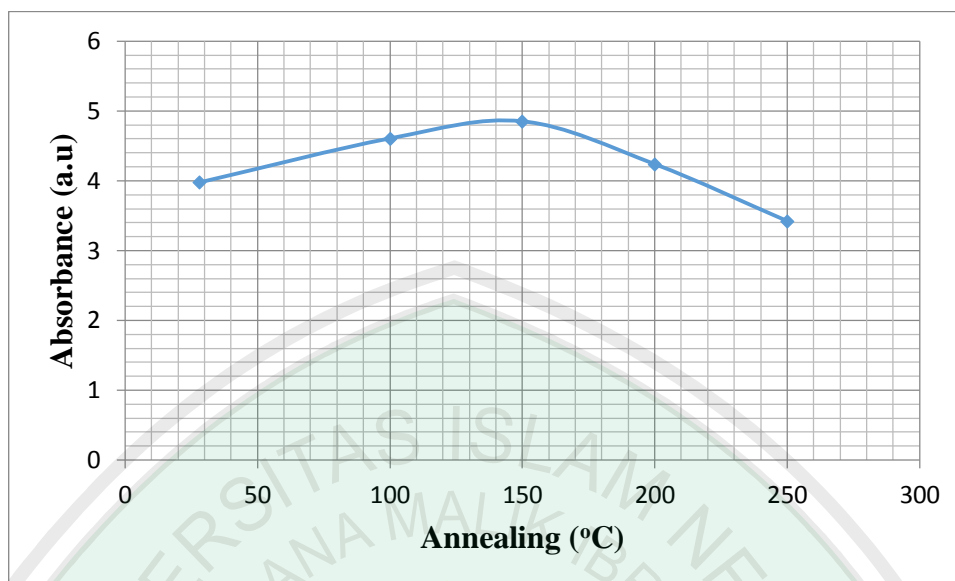


Gambar 4.2 Grafik Absorbansi Lapisan Cu₂O/MgO-SnO₂ terhadap Panjang Gelombang

Gambar 4.2 menunjukkan plot grafik absorbansi lapisan $\text{Cu}_2\text{O}/\text{MgO}-\text{SnO}_2$ terhadap panjang gelombang. Sampel 1 merupakan lapisan $\text{Cu}_2\text{O}/\text{MgO}-\text{SnO}_2$ dengan tanpa perlakuan apapun, sementara sampel 2 sampai 5 dilakukan *annealing* terhadap lapisan Cu_2O dengan suhu $100\text{ }^\circ\text{C}$, $150\text{ }^\circ\text{C}$, $200\text{ }^\circ\text{C}$, dan $250\text{ }^\circ\text{C}$ secara berurutan. Dari gambar 4.2, diketahui bahwa absorbansi terjadi pada panjang gelombang 250-500 nm, dan secara umum serapan maksimum dari semua sampel berada pada daerah ultraviolet (UV).

Tabel 4.1 Pengaruh Variasi *Annealing* Cu_2O terhadap Absorbansi Lapisan $\text{Cu}_2\text{O}/\text{MgO}-\text{SnO}_2$

Perlakuan Sampel $\text{Cu}_2\text{O}/\text{MgO}-\text{SnO}_2$	A (a.u)	λ (nm)
Tanpa annealing Cu_2O	3,976	305
Annealing Cu_2O $100\text{ }^\circ\text{C}$	4,607	305
Annealing Cu_2O $150\text{ }^\circ\text{C}$	4,852	305
Annealing Cu_2O $200\text{ }^\circ\text{C}$	4,239	305
Annealing Cu_2O $250\text{ }^\circ\text{C}$	3,424	305



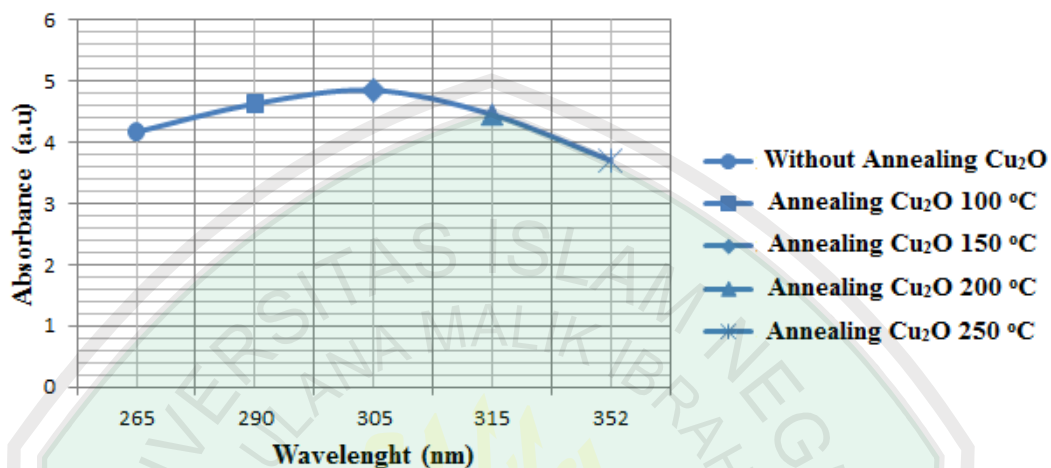
Gambar 4.3 Perubahan Absorbansi Lapisan $\text{Cu}_2\text{O}/\text{MgO}-\text{SnO}_2$ terhadap *Annealing* Cu_2O

Tabel 4.1 dan gambar 4.3 menunjukkan nilai absorbansi pada panjang gelombang 305 nm. Baik dari tabel maupun grafik, diketahui bahwa suhu *annealing* Cu_2O menyebabkan perubahan absorbansi lapisan $\text{Cu}_2\text{O}/\text{MgO}-\text{SnO}_2$. *Annealing* Cu_2O dengan suhu 100 °C dan 150 °C menghasilkan absorbansi yang semakin meningkat, namun pada suhu 200 °C dan 250 °C absorbansi lapisan $\text{Cu}_2\text{O}/\text{MgO}-\text{SnO}_2$ mengalami penurunan. Absorbansi sangat mempengaruhi sifat *solar cell* karena semakin besar absorbansi bahan akan meningkatkan laju terciptanya pasangan *electron-hole*.

Tabel 4.2 Pengaruh Variasi *Annealing* Cu_2O terhadap Pergeseran Absorbansi Maksimum Lapisan $\text{Cu}_2\text{O}/\text{MgO}-\text{SnO}_2$

Perlakuan Sampel $\text{Cu}_2\text{O}/\text{MgO}-\text{SnO}_2$	A (a.u)	λ (nm)
Tanpa annealing Cu_2O	4,171	265
Annealing Cu_2O 100 °C	4,633	290
Annealing Cu_2O 150 °C	4,852	305
Annealing Cu_2O 200 °C	4,456	315

Annealing Cu ₂ O 250 °C	3,704	352
------------------------------------	-------	-----



Gambar 4.4 Pergeseran Absorbansi Lapisan Cu₂O/MgO-SnO₂ terhadap *Annealing* Cu₂O

Pengaruh *annealing* Cu₂O tidak hanya berpengaruh terhadap besar kecilnya absorbansi, tetapi juga dapat menyebabkan pergeseran absorbansi pada panjang gelombang tertentu. Tabel 4.2 dan gambar 4.4 menunjukkan bahwa peningkatan suhu *annealing* Cu₂O pada lapisan Cu₂O/MgO-SnO₂ mengakibatkan pergeseran puncak absorpsi pada daerah UV menuju ke panjang gelombang yang nilainya lebih tinggi. Dengan kata lain, pengaruh *annealing* Cu₂O dapat menurunkan energi *gap* lapisan Cu₂O/MgO-SnO₂, sehingga energi yang diperlukan untuk mengeksitasi elektron menjadi semakin rendah.

b) Hambatan *Heterojunction Solar cell*

Solar cell merupakan perangkat yang terbuat dari hubungan semikonduktor tipe-p dan tipe-n, sama seperti dioda. Namun, lapisan tipe-p dan tipe-n pada *solar cell* dibuat lebih tipis agar seluruh atom-atom penyusunnya dapat mengabsorpsi foton, sehingga semakin banyak elektron dan *hole* yang

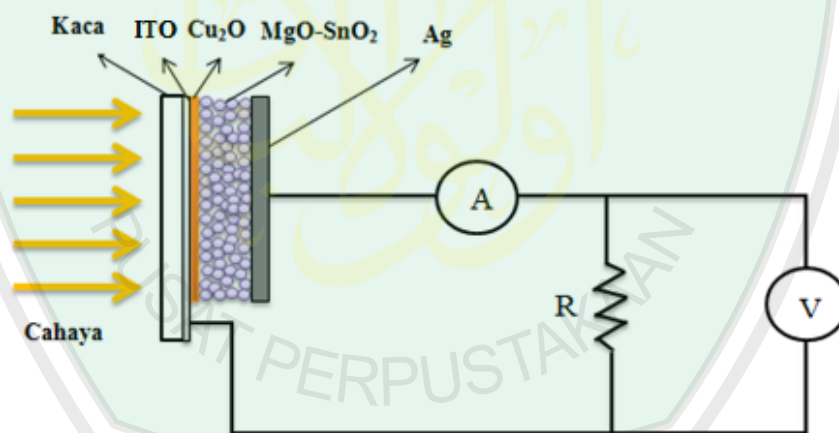
tercipta. Elektron dan *hole* inilah yang kemudian dapat bergerak bebas menghasilkan arus listrik. Arus yang dihasilkan *solar cell* sama dengan arus mundur pada dioda.

Sebagai perangkat yang terdiri dari sambungan semikonduktor tipe-p dan tipe-n, maka *heterojunction solar cell* LCD/Cu₂O/MgO-SnO₂/Ag seharusnya juga mempunyai sifat yang sama seperti dioda, baik terhadap bias maju maupun bias mundur. Pengujian terhadap bias maju dan mundur dapat dilakukan dalam mode Ohm meter. Pengujian bias maju dilakukan dengan cara menghubungkan lapisan konduktif kaca LCD ke bagian positif multimeter dan Ag dihubungkan ke bagian negatif (com) multimeter, serta sebaliknya untuk bias mundur. Jika lapisan Cu₂O/MgO-SnO₂ membentuk *heterojunction* yang sempurna, maka ketika diberi bias maju hambatannya akan sama dengan nol ($R = 0$) dan tak hingga ($R = OL$) untuk bias mundur.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa resistansi bias maju dan mundur pada lapisan Cu₂O/MgO-SnO₂ hampir sama (lampiran 2). Namun, resistansi pada bias mundur sedikit lebih tinggi daripada bias maju. Besarnya resistansi pada masing-masing sampel berbeda. Sampel 1 (tanpa *annealing* Cu₂O) dan sampel 3 (*Annealing* Cu₂O 150 °C) mempunyai resistansi dalam orde ratusan Ohm (Ω), sampel 2 (*Annealing* Cu₂O 100 °C) dan sampel 5 (*Annealing* Cu₂O 250 °C) mempunyai resistansi dalam orde ratusan kilo Ohm ($k\Omega$), sedangkan sampel 4 resistansinya lebih tinggi, yaitu dalam orde mega Ohm. Pengujian hambatan ini menunjukkan bahwa *pn-heterojunction solar cell* yang dihasilkan kurang sempurna.

c) Sifat Listrik *Heterojunction Solar Cell*

Pengujian sifat listrik *heterojunction solar cell* dengan struktur LCD/Cu₂O/MgO-SnO₂/Ag dilaksanakan di Laboratorium Listrik Magnet Jurusan Fisika Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang dengan menggunakan rangkaian uji seperti pada gambar 4.5. Sumber cahaya yang digunakan berasal dari sinar lampu halogen dengan intensitas sebesar 23.500 Lux (1 Lux setara dengan $1,496 \times 10^{-3}$ Watt/m²). Parameter yang diukur dalam pengambilan data adalah arus (I) dan tegangan (V) dengan memvariasikan beban dari nol (0) sampai tak berhingga (∞). Hasil dari pengujian ini diperlihatkan seperti pada tabel 4.3.



Gambar 4.5 Rangkaian Pengujian *Heterojunction Solar Cell*

Tabel 4.3 Data Hasil Pengujian Sifat Listrik *Solar Cell* Menggunakan Lampu Halogen

i (W/m ²)	R (Ω)	V (V)	I (A)	P (W)
35,15	0 k	0	-	0
35,15	100 k	$8,80 \times 10^{-3}$	$8,80 \times 10^{-8}$	$7,74 \times 10^{-10}$
35,15	200 k	$1,36 \times 10^{-2}$	$6,80 \times 10^{-8}$	$9,25 \times 10^{-10}$

35,15	300 k	$2,00 \times 10^{-2}$	$6,67 \times 10^{-8}$	$1,33 \times 10^{-9}$
35,15	400 k	$2,45 \times 10^{-2}$	$6,13 \times 10^{-8}$	$1,50 \times 10^{-9}$
35,15	470 k	$2,70 \times 10^{-2}$	$5,74 \times 10^{-8}$	$1,55 \times 10^{-9}$
35,15	660 k	$2,80 \times 10^{-2}$	$4,24 \times 10^{-8}$	$1,19 \times 10^{-9}$
35,15	880 k	$3,00 \times 10^{-2}$	$3,41 \times 10^{-8}$	$1,02 \times 10^{-9}$
35,15	1 M	$3,14 \times 10^{-2}$	$3,14 \times 10^{-8}$	$9,86 \times 10^{-10}$
35,15	2,2 M	$3,47 \times 10^{-2}$	$1,58 \times 10^{-8}$	$5,47 \times 10^{-10}$
35,15	∞	$3,74 \times 10^{-2}$	0	0

Tabel 4.3 menunjukkan hasil pengujian sifat listrik pada sampel 3 (sampel yang mengalami perlakuan *annealing* Cu₂O 150 °C) dengan menggunakan lampu halogen. Hasil dari pengujian sampel yang lainnya ditampilkan pada lampiran 3. Variasi hambatan pada rangkaian uji digunakan untuk mengetahui nilai dari daya maksimum (P_m) yang dihasilkan *heterojunction solar cell*. Daya maksimum merupakan nilai tertinggi yang diperoleh dari perkalian antara tegangan (V) dan arus (I).

$$P = V.I$$

Nilai efisiensi (η) *solar cell* ITO/Cu₂O/MgO-SnO₂/Ag dapat dihitung menggunakan rumus (2.14):

$$\eta = \frac{P_m}{Axi} \times 100\%$$

dimana A adalah luas permukaan *solar cell* dan i adalah intensitas cahaya.

Data hasil pengujian pada tabel 4.3 menunjukkan bahwa tidak semua parameter sifat listrik dapat teramati. Pengujian menggunakan lampu halogen menghasilkan arus yang sangat kecil, yaitu dalam orde yang lebih kecil dari mikro meter, sementara multimeter yang digunakan mempunyai skala terkecil dalam orde mikro. Keadaan seperti ini mengakibatkan arus yang dihasilkan tidak terbaca oleh multimeter. Untuk menghitung daya yang dihasilkan dari *heterojunction solar cell*, maka nilai arus harus diambil berdasarkan pendekatan hukum Ohm, yaitu menggunakan rumus:

$$I = \frac{V}{R}$$

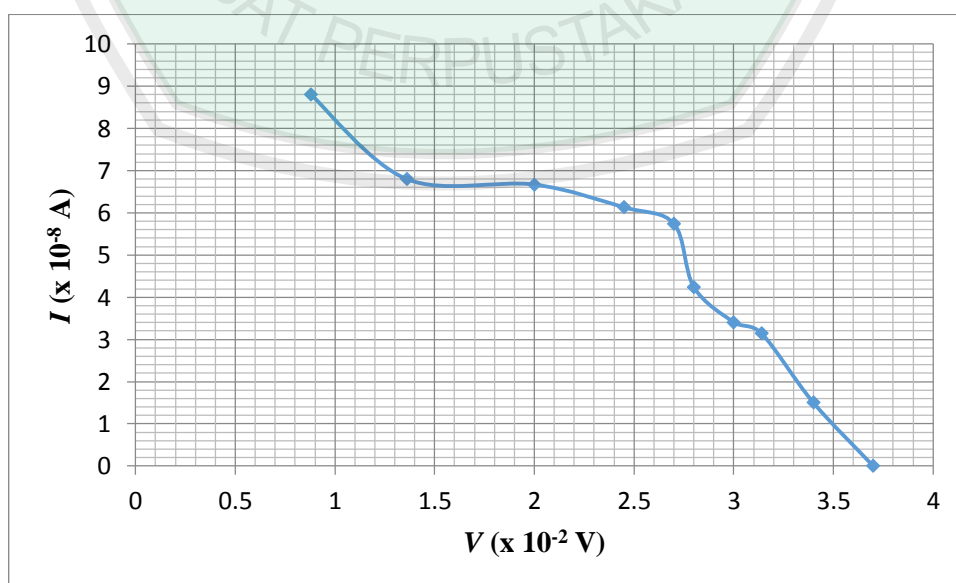
Tabel 4.4 menunjukkan parameter sifat listrik dari hasil pengujian *heterojunction solar cell* dengan menggunakan lampu halogen. Secara umum, peningkatan suhu *annealing* Cu₂O dapat menaikkan efisiensi *heterojunction solar cell*. Tabel 4.5 memperlihatkan bahwa efisiensi terbesar dimiliki oleh sampel 3 (*annealing* Cu₂O sebesar 150 °C), yaitu sebesar 1,96 x 10⁻⁵ %. Nilai efisiensi menurun pada sampel 4 (*annealing* Cu₂O sebesar 200 °C) menjadi 2,07 x 10⁻⁹ % dan naik kembali pada sampel 5 (*annealing* Cu₂O sebesar 250 °C) sebesar 2,66 x 10⁻⁷ %.

Tabel 4.4 Parameter Sifat Listrik dari Pengujian *Heterojunction Solar Cell* Menggunakan Lampu Halogen

Sampel	Halogen $i = 35,15 \text{ W/m}^2$				
	V_{oc} (V)	I_m (A)	V_m (V)	P_m (W)	η (%)
Tanpa annealing Cu ₂ O	$5,00 \times 10^{-04}$	$6,38 \times 10^{-10}$	$3,00 \times 10^{-04}$	$1,91 \times 10^{-13}$	$2,42 \times 10^{-09}$
Annealing	$9,00 \times 10^{-04}$	$1,00 \times 10^{-09}$	$4,00 \times 10^{-04}$	$4,00 \times 10^{-13}$	$5,06 \times 10^{-09}$

Cu ₂ O 100 °C					
Annealing Cu ₂ O 150 °C	$3,74 \times 10^{-02}$	$5,74 \times 10^{-08}$	$2,70 \times 10^{-02}$	$1,55 \times 10^{-09}$	$1,96 \times 10^{-05}$
Annealing Cu ₂ O 200 °C	$1,20 \times 10^{-03}$	$2,73 \times 10^{-10}$	$6,00 \times 10^{-04}$	$1,64 \times 10^{-13}$	$2,07 \times 10^{-09}$
Annealing Cu ₂ O 250 °C	$1,31 \times 10^{-02}$	$3,09 \times 10^{-09}$	$6,8 \times 10^{-03}$	$2,10 \times 10^{-11}$	$2,66 \times 10^{-07}$

Karakteristik dari hasil pengujian *solar cell* dapat ditampilkan dalam bentuk grafik *I-V*. Grafik tersebut merupakan hasil dari variasi hambatan *R* dari nol (0) sampai tak hingga (∞) pada intensitas cahaya yang sama. Oleh karena itu, jika arus (*I*) dan tegangan (*V*) dapat terbaca dengan benar pada setiap variasi *R*, maka grafik karakteristik *I-V* yang dihasilkan akan memberikan informasi nilai arus *short circuit* (I_{sc}), tegangan *open circuit* (V_{oc}), arus maksimum (I_m) dan tegangan maksimum (V_m).



Gambar 4.6 Grafik *I-V Heterojunction Solar Cell* pada Sampel 3 Menggunakan Lampu Halogen.

Gambar 4.6 menunjukkan hasil dari grafik karakteristik *I-V* sampel 3. Grafik yang dihasilkan terlihat kasar karena rentang variasi hambatan yang digunakan sangat tinggi, yaitu dalam orde ratusan Ohm. Parameter sifat listrik yang dapat diketahui secara pasti dari grafik tersebut hanya tegangan *open circuit* (V_{oc}) yaitu sebesar 0,0374 Volt. Arus maksimum (I_m) dan tegangan maksimum (V_m) merupakan arus dan tegangan yang memberikan nilai terbesar pada daya (daya maksimum). Dalam grafik tersebut, I_m dan V_m mempunyai nilai $5,74 \times 10^{-8}$ A dan $2,70 \times 10^{-2}$ V secara berurutan. Arus *short circuit* (I_{sc}) tidak dapat terbaca karena arus yang dihasilkan sangat kecil.

4.2 Pembahasan

Solar cell adalah perangkat yang memanfaatkan cahaya matahari sebagai sumber utama untuk menghasilkan energi listrik. Cahaya merupakan salah satu ciptaan Allah Swt yang melimpah dan sangat ramah lingkungan untuk dijadikan sebagai sumber energi. Allah Swt berfirman:

وَجَعَلْنَا سِرَاجًا وَهَّاجًا

“Dan kami jadikan pelita yang amat terang (matahari).” (QS. an-Naba’ [78]: 13).

Matahari disebut sebagai pelita atau *siraaj* dalam bentuk tunggal yang berarti mempunyai sumber cahaya sendiri atau memberikan cahaya pada benda yang lain (Juoro, 2011). Penciptaan matahari sebagai pelita adalah bagian dari

penciptaan alam semesta oleh Allah Swt. yang merupakan tanda-tanda akan kekuasaan-Nya bagi orang-orang yang mau menggunakan akalinya. Matahari sebagai pelita, berarti dipermukaan matahari terdapat sumber energi yang dapat dibakar (dinyalakan) sehingga energinya dapat dikirim sampai ke bumi. Energi matahari dikirim ke bumi dalam bentuk radiasi elektromagnetik yang sampai di bumi dalam bentuk panas. Secara tradisional, energi matahari telah digunakan untuk mengeringkan pakaian, mengeringkan padi, mengawetkan makanan, dan lain sebagainya. Sekarang energi matahari juga digunakan sebagai sumber tenaga untuk *solar cell* (Wardhana, 2004).

Berdasarkan kajian fisika, cahaya mempunyai sifat dualisme, yakni selain bersifat sebagai gelombang, cahaya juga bersifat sebagai partikel yang disebut foton. Sebuah foton adalah satu kuantum energi elektromagnet yang diserap atau dipancarkan, dan sejalan dengan usulan Planck, tiap-tiap foton dari radiasi berfrekuensi ν memiliki energi (Krane, 2014):

$$E = h\nu \quad (4.1)$$

h adalah tetapan Planck yang mempunyai nilai sebesar $6,626 \times 10^{-34}$ Js.

Energi bersifat kekal, yakni suatu energi dapat diubah menjadi energi lain yang lebih bermanfaat. Energi matahari dapat dikonversi menjadi energi listrik dengan menggunakan perangkat *solar cell*. Selama ini, *solar cell* yang banyak diaplikasikan adalah berbasis semikonduktor silikon. *Solar cell* tersebut mempunyai efisiensi sekitar 28 %, namun proses fabrikasinya tidak mudah dan membutuhkan biaya yang mahal. Dengan tujuan untuk memperoleh manfaat yang lebih dari melimpahnya energi matahari, maka dilakukan penelitian tentang

heterojunction solar cell dengan struktur kaca LCD/Cu₂O/MgO-SnO₂/Ag. Kaca LCD diperoleh dari laptop bekas, Cu₂O diperoleh dari proses CBD, sedangkan lapisan MgO-SnO₂ dan lapisan Ag diperoleh secara *doctor blade*.

Lapisan Cu₂O yang diperoleh dari proses CBD kemudian dilakukan variasi *annealing* dengan suhu ruang (tanpa *annealing*), suhu 100 °C, 150 °C, 200 °C, dan 250 °C selama 1 jam. Berdasarkan hasil yang diperoleh, perlakuan *annealing* berpengaruh terhadap morfologi lapisan Cu₂O. Menurut penelitian yang dilakukan oleh Johan, dkk. (2011), peningkatan suhu *annealing* dapat memperbesar ukuran butir partikel Cu₂O. Semakin tinggi suhu *annealing* menyebabkan ukuran butir partikel Cu₂O semakin besar. Perlakuan *annealing* juga dapat merubah fasa Cu₂O menjadi CuO pada suhu lebih dari 300 °C. Pada suhu 100 °C dan 200 °C fasa yang terbentuk adalah Cu₂O, sedangkan pada suhu 300 °C terdapat dua fasa yaitu Cu₂O dan CuO, dan pada suhu 400 °C fasa yang terbentuk adalah CuO secara keseluruhan. Oleh karena itu, *annealing* pada suhu 250 °C kemungkinan dapat merubah struktur mikro Cu₂O dan muncul fasa baru CuO dengan prosentase yang kecil.

Cu₂O berfungsi sebagai semikonduktor tipe-p sedangkan lapisan komposit MgO-SnO₂ berfungsi sebagai tipe-n. Lapisan *pn-heterojunction* Cu₂O/MgO-SnO₂ merupakan lapisan aktif yang akan menghasilkan muatan bebas ketika berinteraksi dengan cahaya. Untuk mengetahui karakteristik lapisan *pn-heterojunction* Cu₂O/MgO-SnO₂, maka dilakukan pengujian absorbansi dan pengujian hambatan pada bias maju dan mundur seperti pada dioda.

Absorbansi merupakan nilai dari besarnya cahaya yang diserap oleh benda. Secara matematis, besarnya absorbansi diberikan oleh persamaan 2.16 (Kaufmann, 2003):

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

Persamaan tersebut dikenal sebagai hukum Lambert Beer, dimana A adalah absorbansi yang terukur, a koefisien absorpsi, b ketebalan sampel, dan c adalah konsentrasi sampel (*analyte*). Dalam berbagai referensi, koefisien absorpsi dinyatakan dengan simbol β atau α , sedangkan ketebalan dinyatakan dengan simbol l atau x .

Setiap bahan mempunyai koefisien absorpsi yang berbeda-beda. Pada bahan semikonduktor, koefisien absorpsi sangat berpengaruh terhadap laju generasi pasangan *electron-hole* sesuai dengan persamaan berikut (Neamen, 2003):

$$g' = \frac{\alpha I_v(x)}{h\nu} \quad (4.3)$$

Dimana g' adalah laju generasi pasangan *electron-hole* dan $I_v(x)/h\nu$ adalah fluks foton/cahaya. Oleh karena absorbansi berbanding lurus dengan koefisien absorpsi, maka besarnya absorbansi yang terukur pada sampel menjadi parameter yang penting untuk diketahui.

Dari gambar 4.2, diketahui bahwa serapan maksimum (absorbansi maksimum) dari semua sampel berada pada daerah ultraviolet (UV). Serapan pada daerah UV ini sesuai dengan lapisan MgO-SnO₂ yang menurut Ningtyas (2015)

mempunyai *band gap* 4,39 eV. Sedangkan lapisan Cu₂O mempunyai daerah absorpsi dari sinar tampak (*visible*) sesuai dengan nilai energi ambangnya, yaitu sekitar 2,35 sampai 2,42 eV (Timuda, 2006).

Semakin tinggi suhu *annealing* Cu₂O pada lapisan Cu₂O/MgO-SnO₂ mengakibatkan peningkatan dan pergeseran puncak absorpsi. Tabel 4.1 menunjukkan bahwa nilai absorbansi meningkat ketika suhu *annealing* Cu₂O ditinggikan hingga sebesar 150 °C. Sedangkan tabel 4.2 menunjukkan bahwa semakin tinggi suhu *annealing* Cu₂O mengakibatkan pergeseran absorbansi maksimum pada daerah UV menuju ke arah panjang gelombang yang nilainya lebih tinggi. Dengan kata lain, pengaruh *annealing* Cu₂O dapat menurunkan energi yang dibutuhkan untuk menghasilkan *electron-hole* pada lapisan Cu₂O/MgO-SnO₂. Absorbansi dari masing-masing sampel tidak menunjukkan pola yang teratur, baik pada daerah UV maupun *Visible*. Hal ini tidak sesuai dengan hasil penelitian yang telah dilakukan oleh Timuda (2006), yang menyatakan bahwa semakin tinggi suhu *annealing* menyebabkan absorbansi Cu₂O semakin rendah.

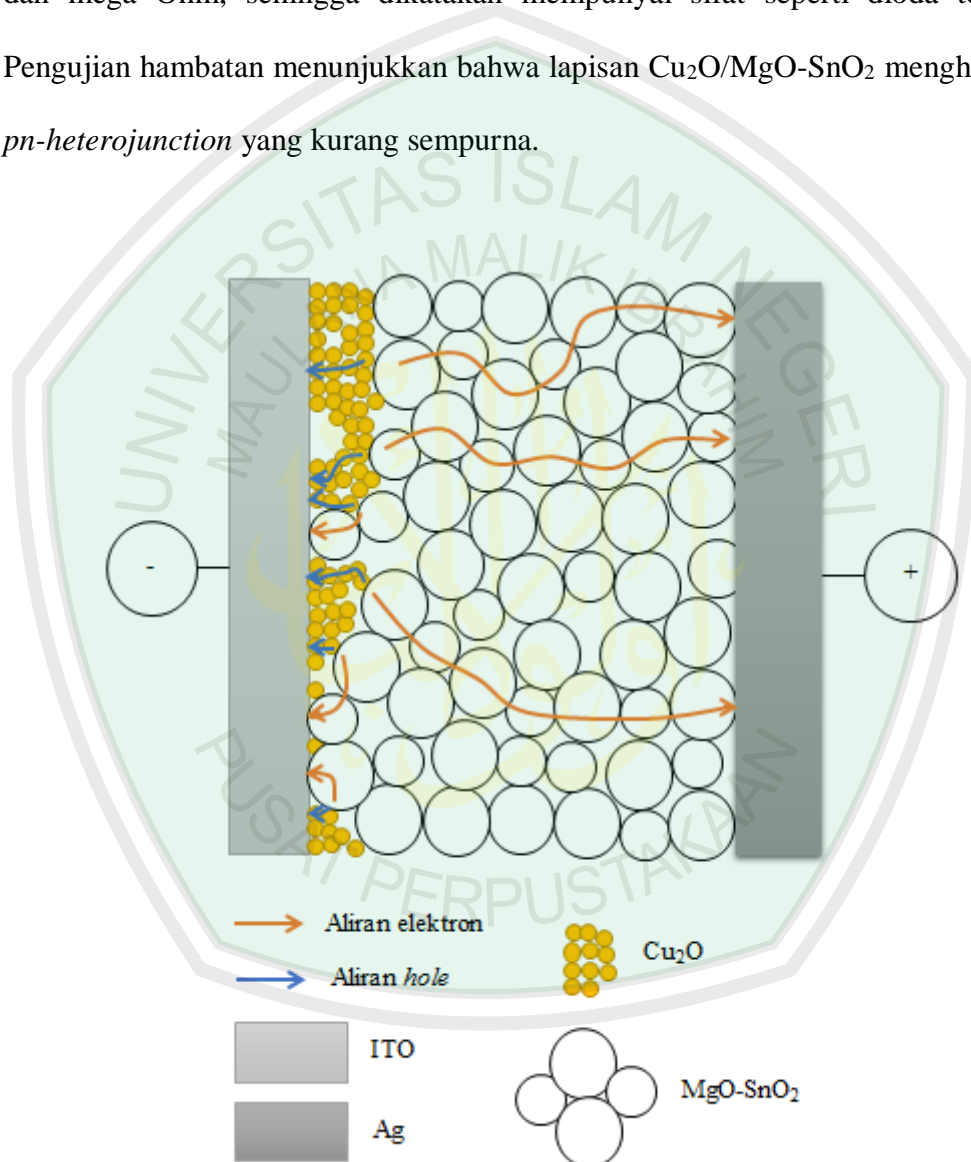
Sampel 1 sampai 3 menunjukkan nilai absorbansi yang semakin meningkat (tabel 4.1). Cu₂O yang tidak mengalami *annealing* (pemanasan) diasumsikan mempunyai bentuk amorf. Sedangkan setelah dipanaskan dengan suhu 100 °C dan 150 °C, partikel Cu₂O membentuk butir. Pertumbuhan butir tersebut yang menyebabkan absorbansi lapisan Cu₂O/MgO-SnO₂ semakin tinggi. Sampel 4 dan 5 menunjukkan penurunan nilai absorbansi. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh perubahan fasa Cu₂O menjadi CuO. Berdasarkan penelitian yang

dilakukan oleh Johan, dkk. (2011), diketahui bahwa perlakuan *annealing* dengan suhu 300 °C mengakibatkan perubahan sebagian fasa Cu_2O menjadi CuO , dan pada suhu 400 °C fasa CuO terbentuk secara keseluruhan. Oleh karena itu, sampel 4 dan 5 pada penelitian ini mengalami perlakuan *annealing* Cu_2O dengan suhu 200 °C dan 250 °C dimungkinkan telah mengalami perubahan struktur mikro dan muncul fasa baru CuO dengan prosentase yang kecil. Perubahan ini juga mengakibatkan pergeseran absorbansi maksimum menuju ke energi yang lebih rendah.

Sebagai lapisan yang terbentuk dari semikonduktor tipe-p dan tipe-n, maka lapisan *pn-heterojunction* $\text{Cu}_2\text{O}/\text{MgO}-\text{SnO}_2$ seharusnya juga mempunyai sifat seperti dioda. Dioda bisa dikatakan baik apabila mempunyai resistansi yang cukup rendah sampai beberapa ratus Ohm pada bias maju dan bias mundur resistansinya sangat tinggi atau bahkan mencapai tak hingga (OL). Jika *pn-heterojunction solar cell* menunjukkan resistansi yang sangat tinggi pada bias maju dan mundur, maka hasil dari persambungan lapisan $\text{Cu}_2\text{O}/\text{MgO}-\text{SnO}_2$ dikatakan mempunyai sifat seperti dioda terbuka (berperilaku seperti saklar terbuka pada bias maju dan bias mundur, sehingga tidak ada arus yang mengalir melalui *pn-heterojunction*). Sedangkan, jika *pn-heterojunction solar cell* menunjukkan resistansi yang rendah (dalam orde puluhan hingga beberapa ratus ohm) pada bias maju dan mundur, maka hasil dari persambungan lapisan $\text{Cu}_2\text{O}/\text{MgO}-\text{SnO}_2$ dikatakan mempunyai sifat seperti dioda tertutup (dioda berperilaku seperti saklar tertutup).

Berdasarkan hasil dari pengujian hambatan *heterojunction solar cell*, diketahui bahwa secara keseluruhan hambatan pada bias mundur sedikit lebih

besar daripada bias maju. Sampel 1 dan 3 mempunyai resistansi dalam orde ratusan Ohm (Ω) sehingga dikatakan mempunyai sifat seperti dioda tertutup. Sampel 2,5, dan 4 mempunyai resistansi yang lebih tinggi, yaitu dalam orde kilo dan mega Ohm, sehingga dikatakan mempunyai sifat seperti dioda terbuka. Pengujian hambatan menunjukkan bahwa lapisan $\text{Cu}_2\text{O}/\text{MgO-SnO}_2$ menghasilkan *pn-heterojunction* yang kurang sempurna.



Gambar 4.7 Skema Aliran *Electron-hole* pada Bias Mundur

Gambar 4.7 memberikan ilustrasi terhadap lapisan Cu_2O dan MgO-SnO_2 yang tidak rata. Rongga-rongga pada lapisan Cu_2O dan MgO-SnO_2 menyebabkan

tingginya hambatan untuk aliran elektron dan *hole* sehingga konduktivitasnya menjadi rendah. Besarnya partikel MgO-SnO₂ dan lapisan Cu₂O yang tidak rata menghasilkan *pn-heterojunction* Cu₂O/MgO-SnO₂ yang kurang sempurna.

Pada bias mundur, elektron-elektron bergerak menuju perak konduktif (Ag) sedangkan *hole* bergerak ke arah kaca LCD, sehingga tidak terdapat arus yang mengalir dari semikonduktor tipe-p (Cu₂O) ke tipe-n (MgO-SnO₂). Hal tersebut disebabkan karena terdapat partikel-partikel MgO-SnO₂ yang bersinggungan langsung dengan kaca LCD (gambar 4.5), maka elektron bebas yang dihasilkan dapat masuk ke kaca LCD dan berekombinasi dengan *hole*. Hal ini menyebabkan *pn-heterojunction* Cu₂O/MgO-SnO₂ bersifat seperti dioda tertutup.

Pengujian efisiensi *heterojunction solar cell* dilakukan menggunakan lampu halogen dengan intensitas 235 Lux atau setara dengan 35,15 W/m². Cahaya lampu halogen mempunyai panjang gelombang dari 371,3 nm sampai 697,7 nm (Armynah, dkk.). Cahaya tersebut akan mengeksitasi elektron pada lapisan Cu₂O/MgO-SnO₂ jika energinya sama dengan energi *gap* semikonduktor Cu₂O dan komposit MgO-SnO₂. Akibat dari eksitasi tersebut, maka tercipta pasangan *electron-hole* yang kemudian dapat bergerak bebas untuk menghantarkan listrik.

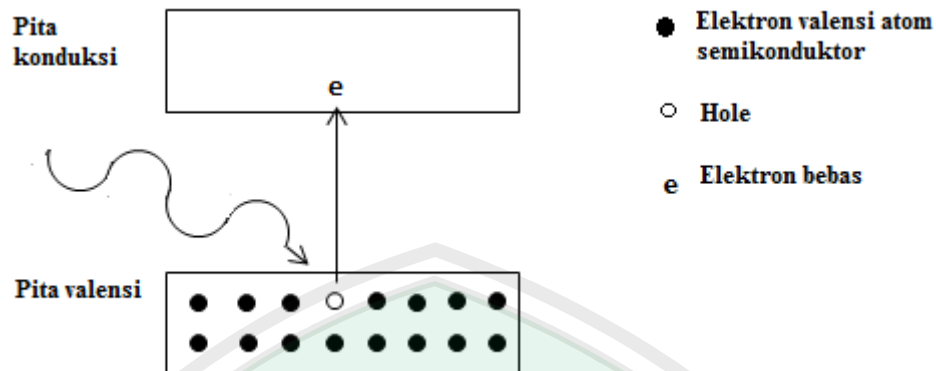
Proses terbentuknya pasangan *electron-hole* tidak dapat diamati dengan mata secara langsung. Pengetahuan seperti ini tidak akan diketahui tanpa adanya pemikiran yang mendalam tentang sifat-sifat material semikonduktor dan interaksinya dengan cahaya. Berkaitan dengan hal ini, Allah Swt. berfirman:

سُبْحَانَ الَّذِي خَلَقَ الْأَزْوَاجَ كُلَّهَا مِمَّا تُنْبِتُ الْأَرْضُ وَمِنْ أَنْفُسِهِمْ وَمِمَّا لَا يَعْلَمُونَ (٣٦)

“Maha suci (Allah) yang telah menciptakan semuanya berpasang-pasangan, baik dari apa yang ditumbuhkan oleh bumi dan dari diri mereka sendiri maupun dari apa yang tidak mereka ketahui”. (QS. Yasin [36]: 36).

(سُبْحَانَ الَّذِي خَلَقَ الْأَزْوَاجَ كُلَّهَا) “Mahasuci Allah yang telah menciptakan semuanya berpasang-pasangan”. Ayat tersebut menunjukkan tanda-tanda kekuasaan dan ilmu Allah Swt. Hal ini terlihat pada penciptaan makhluk yang berpasang-pasangan, baik tumbuh-tumbuhan, binatang, manusia, serta apa-apa yang tidak diketahui oleh mereka. Tidak ada yang tunggal kecuali Allah Ta’ala (al-Jaizari, 2009).

Berdasarkan perenungan dan penelitian yang panjang, ilmuwan fisika mengetahui bahwa elektron mempunyai pasangan berupa anti elektron dan disebut sebagai positron. Elektron-positron dapat musnah ketika bertemu dan berubah menjadi radiasi foton, sebaliknya dari ketiadaan pasangan dapat tercipta pasangan elektron-positron (Purwanto, 2008). Dalam aplikasi *solar cell*, cahaya akan mengeksitasi elektron dari pita valensi ke pita konduksi pada lapisan semikonduktor. Jika elektron tereksitasi, maka elektron tersebut akan menghasilkan *hole* pada pita valensi. Oleh karena itu, *electron-hole* dapat dikatakan sebagai pasangan yang tercipta pada saat bahan semikonduktor atau *solar cell* berinteraksi dengan cahaya.



Gambar 4.8 Proses Terciptanya Pasangan *Electron-hole*

Pada *solar cell*, *hole* yang tercipta akan berkumpul di permukaan semikonduktor tipe-p (Cu_2O), sedangkan elektron bebas akan berkumpul pada permukaan tipe-n (MgO-SnO_2), sama seperti dioda yang diberi bias mundur. Jika kedua semikonduktor tersebut dihubungkan dengan rangkaian luar, maka akan terjadi aliran elektron dan *hole*, sehingga menghasilkan arus listrik.

Berbagai parameter yang perlu diketahui dari pengujian sifat listrik *solar cell* adalah arus *short circuit* (I_{sc}), tegangan *open circuit* (V_{oc}), daya maksimum (P_m), efisiensi (η), dan *fill factor* (FF). I_{sc} merupakan arus yang muncul ketika hambatan luar (R) sama dengan nol (0), sedangkan V_{oc} merupakan tegangan yang muncul ketika R sama dengan tak hingga (∞). Pengujian sifat listrik menunjukkan bahwa I_{sc} tidak terbaca karena arus yang dihasilkan terlalu kecil. Oleh karena I_{sc} tidak diketahui, maka FF juga tidak dapat diketahui. Untuk menghitung P_m maka nilai arus didekati dengan hukum Ohm ($I = V/R$) dan kemudian dikalikan dengan tegangan yang dihasilkan. P_m berbanding lurus dengan η , sehingga semakin besar P_m , maka η juga semakin besar (tabel 4.4).

Variasi *annealing* Cu₂O pada *heterojunction solar cell* dengan struktur kaca LCD/Cu₂O/MgO-SnO₂/Ag menghasilkan efisiensi yang berbeda-beda. Secara keseluruhan, semakin besar suhu *annealing* dapat meningkatkan efisiensi *solar cell*. Variasi *annealing* dengan suhu ruang, 100 °C dan 150 °C menunjukkan nilai yang semakin meningkat. Namun pada suhu 200 °C efisiensi menurun dan kembali naik pada suhu 250 °C.

Berdasarkan pengujian sifat listrik, efisiensi tertinggi dari *heterojunction solar cell* LCD/Cu₂O/MgO-SnO₂/Ag dimiliki oleh sampel 3 (sampel dengan suhu *annealing* Cu₂O 150 °C) yaitu sebesar $1,96 \times 10^{-5}$ %. Hal ini sesuai dengan hasil pengujian sifat optik yang telah dilakukan. Sifat optik menunjukkan kemampuan bahan dalam menciptakan *electron-hole* ketika terjadi interaksi antara bahan semikonduktor dengan cahaya. Sampel 3 mempunyai absorbansi tertinggi daripada sampel lainnya, yaitu sebesar 4,852 a.u dengan panjang gelombang 305 nm. Absorbansi tersebut merupakan yang tertinggi daripada sampel yang lain. Oleh karena itu, *electron-hole* yang tercipta pada sampel 3 jauh lebih banyak daripada sampel yang lain.

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, hasil karakterisasi dari *heterojunction solar cell* dengan struktur kaca LCD/Cu₂O/MgO-SnO₂/Ag dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Variasi *annealing* Cu₂O pada lapisan Cu₂O/MgO-SnO₂ menyebabkan perubahan nilai dan pergeseran absorbansi maksimum menuju ke panjang gelombang yang nilainya lebih tinggi. Secara umum, absorbansi pada semua variasi *annealing* Cu₂O terjadi pada panjang gelombang 250-500 nm. Nilai absorbansi yang paling tinggi dimiliki oleh sampel dengan *annealing* Cu₂O 150 °C, yaitu sebesar 4,852 a.u dengan panjang gelombang 305 nm.
2. Secara keseluruhan, hambatan bias mundur *heterojunction solar cell* sedikit lebih besar daripada bias maju. Sampel 1 (tanpa *annealing* Cu₂O) dan sampel 3 (*annealing* Cu₂O 150 °C) mempunyai hambatan dalam orde ratusan Ohm, sampel 2 (*annealing* Cu₂O 100 °C) dan 5 (*annealing* Cu₂O 250 °C) mempunyai hambatan dalam orde kilo Ohm, sedangkan sampel 4 (*annealing* Cu₂O 200 °C) mempunyai hambatan dalam orde mega Ohm. Hasil tersebut menunjukkan bahwa persambungan lapisan Cu₂O/MgO-SnO₂ menghasilkan *pn-heterojunction* yang kurang sempurna.
3. Peningkatan *annealing* Cu₂O pada suhu 100 °C dan 150 °C meningkatkan nilai tegangan *open circuit* (V_{oc}) dan efisiensi (η) *heterojunction solar cell* LCD/Cu₂O/MgO-SnO₂/Ag. Nilai pada parameter sifat listrik tersebut

mengalami penurunan pada suhu *annealing* 200 °C dan naik kembali pada suhu 250 °C. Hasil yang terbaik dari pengujian sifat listrik dimiliki oleh sampel 3 (*annealing* Cu₂O 150°C) dengan tegangan *open circuit* (V_{oc}) = 3,74 x 10⁻⁰² V, arus maksimum (I_m) = 5,74 x 10⁻⁸ A, tegangan maksimum (V_m) = 2,70 x 10⁻² V, daya maksimum (P_m) = 1,55 x 10⁻⁹ Watt dan efisiensi (η) = 1,96 x 10⁻⁵ %.

5.2 Saran

Penulis menyadari bahwa penelitian ini masih jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu, beberapa saran yang dapat penulis berikan untuk penelitian selanjutnya antara lain:

1. Pendeposisian Cu₂O lebih baik dilakukan pada kaca ITO atau FTO karena transparansi dan konduktivitasnya jauh lebih baik daripada kaca LCD.
2. Sebagai semikonduktor tipe-n, campuran MgO-SnO₂ lebih baik diproses sampai membentuk fasa MgSnO₃ atau Mg₂SnO₄, karena Mg yang terdoping dapat memperbaiki energi *gap* dan konduktivitas SnO₂.
3. Proses pelapisan atau persambungan bahan semikonduktor juga perlu diperhatikan supaya dapat menghasilkan lapisan yang lebih tipis dan rata, sehingga *pn-heterojunction* terbentuk lebih sempurna. Selain dari *chemical bath deposition* (CBD), proses pelapisan bahan semikonduktor juga dapat dilakukan dengan metode *spin coating*, *sputtering*, dan *chemical vapor deposition* (CVD).

DAFTAR PUSTAKA

- Abdu dan Musa. 2009. *Copper (I) Oxide (Cu₂O) Based Solar Cells – A Review*. Bayero Journal of Pure and Applied Science, 2(2): 8 – 12.
- Ali Syed Mansoor, dkk. 2013. *Effect of Doping on the Structural and Optical Properties of SnO₂ Thin Films fabricated by Aerosol Assisted Chemical Vapor Deposition*. Journal of Physics: Conference Series 439 (2013) 012013.
- al-Jaizari, Abu Bakar Jabir. 2009. *Tafsir Al-Qur'an al-Aisar Jilid 6*. Jakarta: Darus Sunnah.
- Anonim. 2012. *Pengembangan Energi Baru Terbarukan (EBT) guna Penghematan Bahan Baku Fosil dalam Rangka Ketahanan Energi Nasional*. Kajian Lemhannas RI Edisi 14.
- Armynah, Bidyatul, dkk. *Pemanfaatan Kamera Digital untuk Menggambar Panjang Gelombang Spektrum Berbagai Jenis Lampu*. Universitas Hasanuddin.
- Askeland, dkk. 2010. *The Science an Engineering of Materials Sixth Edition*. USA: Cengage Learning.
- Astuti, Santi Yuli. 2011. *Struktur dan Sifat Listrik Film Tipis CdTe:Cu yang Ditumbuhkan dengan Metode DC Magnetron Sputtering*. Skripsi Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Negeri Semarang.
- Batzill, Matthias dan Ulrike Diebold. 2005. *The Survace and Material Science of Thin Oxide*. Volume 79. Hal. 47-154.
- Blocher, Richard. 2004. *Dasar Elektronika*. Yogyakarta: Andi.
- Bube, Ricard H. 1998. *Photovoltaic Material*. USA: Imperial College Press.
- Callister, William D. 2014. *Material Science and Engineering an Introduction*. USA: John Wiley and Sons.
- Considine, Glenn D. 2005. *Van Nostrand's Encyclopedia of Chemistry Fifth Edition*. A John Willey & Sons, Inc. Publication.
- Day, R.A dan Underwood A.L. 1999. *Analisis Kimia Kuantitatif*. Jakarta: Erlangga.
- Effendy. 2010. *Logam, Aloi, Semikonduktor, dan Superkonduktor*. Malang: Bayumedia.
- Enderlein, Rolf dan Horing, Norman J. M. 1999. *Fundamental of Semiconductor Physics and Devices*. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.

- Fukuda dan Ichimura. 2013. *Hetero Solar Cells Based on Sol-Gel Deposited SnO₂ and Electrochemically Deposited Cu₂O*. Material Science and Applications, 2013,4, 1-4.
- Huang, Feng. Zhengyoung Yuan, Hui Zhan, Yunhoung Zhou, Jutang Sun. 2004. *Synthesis and Electrochemical performance of nanosized Magnesium tin Composite Oxides*. China: Department of Chamistry, Wuhan University.
- Ievskaya, Yulia, dkk. 2015. *Fabrication of ZnO/Cu₂O Heterojunctions in Atmospheric Condition: Improved Interface Quality and Solar Cell Performance*. Solar Energy Materials and Solar Cells. Volume 135: 43-48.
- Jedynak, L. dkk. 2011. *Refractoris from the MgO-Al₂O₃-SnO₂ System for Metallurgical Application*. Ceramic Material. 63, 1: 34-39.
- Jeong, SeongHo.2010. *Thin Zinc Oxide and Cuprous Oxide Films for Photovoltaic Applications*. A Dissertation Submitted to The Faculty of The raduate School of The University of Minnesota.
- Jha, A.R. 2010. *Solar Cell Technology and Application*. USA: Taylor and Francis Group.
- Johan, Mohd Rafie, dkk. 2011. *Annealing Effects on the Properties of Copper Oxide Thin Film Prepared by Chemical Deposition*. Int. J. Electrochem. Sci., 6 (2011) 6094 – 6104.
- Juoro, Umar. 2011. *Kebenaran al-Qur'an dalam Sains*. Jakarta: Pustaka CideSindo.
- Kaufmann, Elton N. 2003. *Characterization of Materials*. Canada: John Wiley and Sons.
- Krane, Kenneth. 2014. *Fisika Modern*. Jakarts: UI Press.
- Ludin, N.A, dkk. *Review on The Development of Nature Dye Photosensitizer for Dye Sensitized Solar Cell*. Renewable and Suinable Energy, 336-396.
- Motoyoshi, dkk. 2010. *Fabrication and Characterization of Copper System Compound Semiconductor Solar Cell*. Advances in Materials Science and Engineering. Volume 2010, Articiel ID 562842. Hindawi Publishing Corporation.
- Moulson, AJ dan JM. Herbert. 2003. *Electroc ceramic Materials, Properties, Application*. 2nd Edition. John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester. England:West Sussex PO19 8SQ.
- Naje, dkk. 2013. *Preparation and Characterization of SnO₂ Nanoparticle*. University of Baghdad Iraq.
- Neamen, Donald A. 2003. *Semiconductor Physics And Devices*. New York: McGraw-Hill.

- Ningtyas, Linda S dan Rani Erika. 2015. *Pengaruh Variasi Temperatur Kalsinasi dan Komposisi Campuran terhadap Sifat Optik Bahan Semikonduktor MgO-SnO₂*. Skripsi Jurusan Fisika, UIN Maulana Malik Ibrahim Malang. Tidak diterbitkan.
- Ohajianya, Anthony dan Abumere Oamen. 2013. *Effect of Cuprous Oxide (Cu₂O) Film Thickness on The Efficiency of The Copper-Cuprous Oxide (Cu₂O/Cu) Solar Cell*. The International Journal Of Engineering And Science (IJES). ISSN(e): 2319 – 1813 ISSN(p): 2319 – 1805.
- Parno. 2006. *Fisika Zat Padat*. Malang: Universitas Negeri Malang.
- Purwanto, Agus. 2008. *Ayat-ayat Semesta*. Bandung: Mizan.
- Rahayu, Ita Sri dan Hastuti Erna. 2015. *Pengaruh Variasi Temperatur Kalsinasi Terhadap Sifat Listrik Bahan Semikonduktor MgO-SnO₂*. Skripsi Jurusan Fisika, UIN Maulana Malik Ibrahim Malang. Tidak diterbitkan.
- Ravichandran, dkk. 2014. *Optical Properties of Modified - Silar Grown Copper Oxide Nanocrystalline Thin Film*. International Journal of Information Research and Review. Vol. 1, Issue, 1, pp. 007-011.
- Rio, Reka dan Masamori Iida. 1982. *Fisika dan Teknologi Semikonduktor*. Jakarta: Pradnya Pratama.
- Shihab, Quraish. 2002. *Tafsir al-Mishbah: Pesan, Kesan dan Keserasian al-Qur'an*. Jakarta: Lentera Hati.
- Singh, Ashok K dan Nakate Umesh T. 2013. *Microwave Synthesis, Characterization and Photocatalytic Properties of SnO₂ Nanoparticles*. Journal Scientific Research. Advances in Nanoparticles, 2013, 2, 66-70.
- Sugiyono, Agus. 2014. *Outlook Energi Indonesia 2014*. BPPT.
- Timuda, Gerald Ensang dan Akhirudin Madu. 2010. *Pengaruh Ketebalan terhadap Sifat Optik Lapisan Semikonduktor Cu₂O yang Dideposisikan dengan Metode Chemical Bath Deposition (CBD)*. Jurnal Ilmu Pengetahuan dan Teknologi TELAAH volume 28, November 2010.
- Timuda, Gerald Ensang. 2006. *Karakterisasi Optik Lapisan Semikonduktor Cu₂O yang Dibuat dengan Deposisi Kimia*. Bogor: Departemen Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam.
- Wardhana, Wisnu Arya. 2004. *al-Qur'an dan Energi Nuklir*. Yogyakarta: Pustaka Pelajar Offset.
- Ying, Song. 2014. *Electrochemical Deposition of Cu₂O/ZnO Heterojunctions and Applications to Solar Cells*. Thesis for Ph. D. degree of engineering Nagoya: Department of Engineering Physics, Electronics and Mechanics, Graduate School of Engineering, Nagoya Institute of Technology.
- Yulianto, Brian. 2011. *Solar Cell*. Bandung: ITB.



LAMPIRAN

Lampiran 1. Pengujian Absorbansi Lapisan Cu₂O/MgO-SnO₂

TEST SETUP

GENESYS 10S UV-Vis v4.003 2L9P286007

Scanning, "4:54am 29Mar16"

Scan Speed, "Fast"

Test Name, "A"

Interval, "5.0nm"

Measurement Mode, "Absorbance"

Cell Correction, "Off"

Start Wavelength, "200.0nm"

ID# (0=OFF), "1"

Stop Wavelength, "1100.0nm"

Auto Save Data, "On"

Sample Positioner, "Auto 6"

Data File Name, "SMPL1"

λ (nm)	A (a.u)	λ (nm)	A (a.u)	λ (nm)	A (a.u)	λ (nm)	A (a.u)	λ (nm)	A (a.u)	λ (nm)	A (a.u)
200	1.827	355	3.494	510	2.453	665	2.206	820	2.102	975	1.987
205	1.734	360	3.426	515	2.441	670	2.199	825	2.083	980	1.988
210	2.648	365	3.325	520	2.412	675	2.203	830	2.083	985	1.986
215	2.367	370	3.308	525	2.404	680	2.206	835	2.083	990	1.982
220	2.161	375	3.268	530	2.398	685	2.196	840	2.072	995	1.966
225	2.248	380	3.254	535	2.367	690	2.199	845	2.077	1000	1.974
230	2.456	385	3.238	540	2.371	695	2.19	850	2.082	1005	1.971
235	2.84	390	3.128	545	2.357	700	2.183	855	2.073	1010	1.967
240	3.348	395	3.16	550	2.35	705	2.177	860	2.068	1015	1.966
245	3.493	400	3.156	555	2.334	710	2.161	865	2.073	1020	1.961
250	3.751	405	3.055	560	2.315	715	2.165	870	2.056	1025	1.966
255	3.615	410	3.042	565	2.314	720	2.18	875	2.056	1030	1.968
260	3.883	415	3.007	570	2.295	725	2.165	880	2.038	1035	1.954
265	4.171	420	3.016	575	2.306	730	2.158	885	2.038	1040	1.944
270	3.656	425	2.98	580	2.296	735	2.154	890	2.046	1045	1.955
275	3.963	430	2.932	585	2.285	740	2.141	895	2.038	1050	1.947
280	3.982	435	2.939	590	2.282	745	2.138	900	2.035	1055	1.94
285	3.947	440	2.905	595	2.273	750	2.141	905	2.037	1060	1.93
290	4.02	445	2.9	600	2.269	755	2.152	910	2.05	1065	1.951
295	3.975	450	2.881	605	2.259	760	2.143	915	2.035	1070	1.95
300	3.907	455	2.832	610	2.262	765	2.131	920	2.021	1075	1.926
305	3.976	460	2.826	615	2.262	770	2.127	925	2.016	1080	1.954
310	3.968	465	2.804	620	2.247	775	2.113	930	2.028	1085	1.928
315	3.95	470	2.756	625	2.253	780	2.14	935	2.018	1090	1.93
320	3.85	475	2.682	630	2.242	785	2.123	940	2.013	1095	1.951
325	4.047	480	2.654	635	2.235	790	2.128	945	2.008	1100	1.927
330	3.802	485	2.62	640	2.236	795	2.121	950	2.001		
335	3.766	490	2.566	645	2.23	800	2.109	955	2.003		
340	3.484	495	2.528	650	2.232	805	2.101	960	2.005		
345	3.655	500	2.5	655	2.205	810	2.111	965	1.993		
350	3.473	505	2.474	660	2.217	815	2.103	970	1.986		

TEST SETUP

GENESYS 10S UV-Vis v4.003 2L9P286007

Scanning, "6:54am 29Mar16"

Scan Speed, "Fast"

Test Name, "A"

Interval, "5.0nm"

Measurement Mode, "Absorbance"

Cell Correction, "Off"

Start Wavelength, "200.0nm"

ID# (0=OFF), "1"

Stop Wavelength, "1100.0nm"

Auto Save Data, "On"

Sample Positioner, "Auto 6"

Data File Name, "SMPL4"

λ (nm)	A (a.u)	λ (nm)	A (a.u)	λ (nm)	A (a.u)	λ (nm)	A (a.u)	λ (nm)	A (a.u)	λ (nm)	A (a.u)
200	0.946	355	4.123	510	2.713	665	2.407	820	2.272	975	2.128
205	0.801	360	4.065	515	2.687	670	2.383	825	2.224	980	2.111
210	0.776	365	3.807	520	2.667	675	2.383	830	2.22	985	2.129
215	0.802	370	3.946	525	2.645	680	2.366	835	2.233	990	2.114
220	0.788	375	3.855	530	2.618	685	2.364	840	2.242	995	2.11
225	0.948	380	3.725	535	2.607	690	2.379	845	2.226	1000	2.126
230	1.275	385	3.608	540	2.595	695	2.36	850	2.234	1005	2.112
235	1.626	390	3.717	545	2.595	700	2.339	855	2.224	1010	2.106
240	2.018	395	3.598	550	2.587	705	2.365	860	2.219	1015	2.106
245	2.408	400	3.632	555	2.555	710	2.351	865	2.213	1020	2.119
250	2.811	405	3.582	560	2.544	715	2.327	870	2.228	1025	2.136
255	3.17	410	3.425	565	2.545	720	2.335	875	2.204	1030	2.126
260	3.441	415	3.378	570	2.523	725	2.349	880	2.179	1035	2.103
265	3.555	420	3.363	575	2.526	730	2.318	885	2.177	1040	2.121
270	3.615	425	3.304	580	2.497	735	2.326	890	2.19	1045	2.118
275	3.769	430	3.252	585	2.518	740	2.316	895	2.178	1050	2.108
280	4.039	435	3.214	590	2.478	745	2.32	900	2.189	1055	2.108
285	4.369	440	3.185	595	2.479	750	2.323	905	2.164	1060	2.139
290	4.234	445	3.165	600	2.493	755	2.308	910	2.171	1065	2.133
295	4.287	450	3.123	605	2.461	760	2.308	915	2.164	1070	2.115
300	4.298	455	3.087	610	2.459	765	2.289	920	2.165	1075	2.175
305	4.239	460	3.032	615	2.468	770	2.293	925	2.17	1080	2.056
310	4.325	465	2.995	620	2.453	775	2.323	930	2.161	1085	2.103
315	4.456	470	2.986	625	2.46	780	2.304	935	2.164	1090	2.12
320	****	475	2.925	630	2.424	785	2.295	940	2.14	1095	2.176
325	4.31	480	2.888	635	2.437	790	2.271	945	2.152	1100	2.218
330	4.359	485	2.839	640	2.415	795	2.27	950	2.141		
335	****	490	2.805	645	2.407	800	2.254	955	2.141		
340	4.361	495	2.79	650	2.426	805	2.265	960	2.145		
345	4.204	500	2.738	655	2.423	810	2.257	965	2.139		
350	4.296	505	2.734	660	2.405	815	2.259	970	2.135		

TEST SETUP

GENESYS 10S UV-Vis v4.003 2L9P286007

Scanning, "6:58am 29Mar16" Scan Speed, "Fast"
 Test Name, "A" Interval, "5.0nm"
 Measurement Mode, "Absorbance" Cell Correction, "Off"
 Start Wavelength, "200.0nm" ID# (0=OFF), "1"
 Stop Wavelength, "1100.0nm" Auto Save Data, "On"
 Sample Positioner, "Auto 6" Data File Name, "SMPL5"

λ (nm)	A (a.u)	λ (nm)	A (a.u)	λ (nm)	A (a.u)	λ (nm)	A (a.u)	λ (nm)	A (a.u)	λ (nm)	A (a.u)
200	0.657	355	3.549	510	2.643	665	2.386	820	2.232	975	2.139
205	0.666	360	3.479	515	2.619	670	2.377	825	2.221	980	2.133
210	0.645	365	3.388	520	2.607	675	2.359	830	2.218	985	2.137
215	0.658	370	3.297	525	2.577	680	2.362	835	2.227	990	2.128
220	0.645	375	3.28	530	2.575	685	2.342	840	2.215	995	2.106
225	0.777	380	3.317	535	2.56	690	2.345	845	2.215	1000	2.116
230	1.155	385	3.352	540	2.553	695	2.334	850	2.23	1005	2.129
235	1.468	390	3.316	545	2.53	700	2.329	855	2.221	1010	2.118
240	1.831	395	3.245	550	2.515	705	2.338	860	2.229	1015	2.108
245	2.232	400	3.24	555	2.504	710	2.313	865	2.232	1020	2.117
250	2.577	405	3.212	560	2.496	715	2.296	870	2.208	1025	2.107
255	2.799	410	3.16	565	2.49	720	2.31	875	2.203	1030	2.119
260	3.072	415	3.109	570	2.492	725	2.33	880	2.203	1035	2.109
265	3.101	420	3.12	575	2.472	730	2.32	885	2.172	1040	2.113
270	3.152	425	3.09	580	2.45	735	2.298	890	2.195	1045	2.106
275	3.24	430	3.036	585	2.454	740	2.3	895	2.171	1050	2.101
280	3.315	435	3.025	590	2.452	745	2.286	900	2.186	1055	2.089
285	3.386	440	2.999	595	2.455	750	2.303	905	2.177	1060	2.11
290	3.405	445	2.971	600	2.448	755	2.321	910	2.172	1065	2.103
295	3.591	450	2.933	605	2.436	760	2.304	915	2.171	1070	2.096
300	3.534	455	2.904	610	2.431	765	2.285	920	2.165	1075	2.087
305	3.424	460	2.902	615	2.446	770	2.293	925	2.157	1080	2.081
310	3.517	465	2.85	620	2.425	775	2.284	930	2.155	1085	2.058
315	3.511	470	2.81	625	2.437	780	2.283	935	2.159	1090	2.044
320	3.451	475	2.822	630	2.423	785	2.288	940	2.146	1095	2.024
325	3.704	480	2.789	635	2.407	790	2.262	945	2.145	1100	2.023
330	3.583	485	2.776	640	2.42	795	2.254	950	2.147		
335	3.465	490	2.727	645	2.396	800	2.244	955	2.141		
340	3.506	495	2.69	650	2.407	805	2.256	960	2.144		
345	3.554	500	2.666	655	2.399	810	2.25	965	2.147		
350	3.609	505	2.649	660	2.381	815	2.257	970	2.134		

TEST SETUP

GENESYS 10S UV-Vis v4.003 2L9P286007

Scanning, "6:43am 29Mar16"

Test Name, "A"

Measurement Mode, "Absorbance"

Start Wavelength, "200.0nm"

Stop Wavelength, "1100.0nm"

Sample Positioner, "Auto 6"

Scan Speed, "Fast"

Interval, "5.0nm"

Cell Correction, "Off"

ID# (0=OFF), "1"

Auto Save Data, "On"

Data File Name, "SMPL3"

λ (nm)	A (a.u)	λ (nm)	A (a.u)	λ (nm)	A (a.u)	λ (nm)	A (a.u)	λ (nm)	A (a.u)	λ (nm)	A (a.u)
200	0.943	355	3.916	510	2.612	665	2.345	820	2.221	975	2.106
205	0.788	360	3.747	515	2.583	670	2.33	825	2.184	980	2.096
210	0.806	365	3.871	520	2.567	675	2.333	830	2.198	985	2.108
215	0.785	370	3.957	525	2.552	680	2.323	835	2.196	990	2.101
220	0.803	375	3.884	530	2.532	685	2.311	840	2.202	995	2.087
225	0.945	380	3.84	535	2.528	690	2.311	845	2.205	1000	2.111
230	1.257	385	3.558	540	2.502	695	2.318	850	2.198	1005	2.101
235	1.617	390	3.458	545	2.502	700	2.298	855	2.201	1010	2.093
240	1.995	395	3.426	550	2.51	705	2.292	860	2.176	1015	2.094
245	2.435	400	3.34	555	2.487	710	2.289	865	2.19	1020	2.103
250	2.785	405	3.338	560	2.475	715	2.281	870	2.177	1025	2.098
255	3.178	410	3.255	565	2.464	720	2.296	875	2.167	1030	2.096
260	3.385	415	3.252	570	2.464	725	2.291	880	2.179	1035	2.098
265	3.58	420	3.164	575	2.446	730	2.286	885	2.158	1040	2.104
270	3.77	425	3.101	580	2.43	735	2.274	890	2.172	1045	2.096
275	3.841	430	3.08	585	2.44	740	2.257	895	2.161	1050	2.096
280	4.342	435	3.052	590	2.428	745	2.297	900	2.145	1055	2.117
285	4.116	440	3.016	595	2.412	750	2.291	905	2.149	1060	2.138
290	4.357	445	2.968	600	2.418	755	2.255	910	2.15	1065	2.124
295	4.556	450	2.931	605	2.405	760	2.253	915	2.152	1070	2.216
300	4.315	455	2.922	610	2.4	765	2.246	920	2.135	1075	2.118
305	4.852	460	2.87	615	2.375	770	2.249	925	2.132	1080	2.142
310	4.457	465	2.848	620	2.396	775	2.249	930	2.149	1085	2.112
315	4.577	470	2.827	625	2.379	780	2.26	935	2.146	1090	2.197
320	4.913	475	2.811	630	2.383	785	2.236	940	2.119	1095	2.231
325	****	480	2.768	635	2.372	790	2.225	945	2.118	1100	2.241
330	****	485	2.715	640	2.37	795	2.248	950	2.127		
335	4.24	490	2.687	645	2.356	800	2.224	955	2.121		
340	****	495	2.663	650	2.333	805	2.229	960	2.127		
345	4.166	500	2.656	655	2.365	810	2.229	965	2.119		
350	4.384	505	2.629	660	2.345	815	2.21	970	2.11		

TEST SETUP

GENESYS 10S UV-Vis v4.003 2L9P286007

Scanning, "5:25am 29Mar16"

Scan Speed, "Fast"

Test Name, "A"

Interval, "5.0nm"

Measurement Mode, "Absorbance"

Cell Correction, "Off"

Start Wavelength, "200.0nm"

ID# (0=OFF), "1"

Stop Wavelength, "1100.0nm"

Auto Save Data, "On"

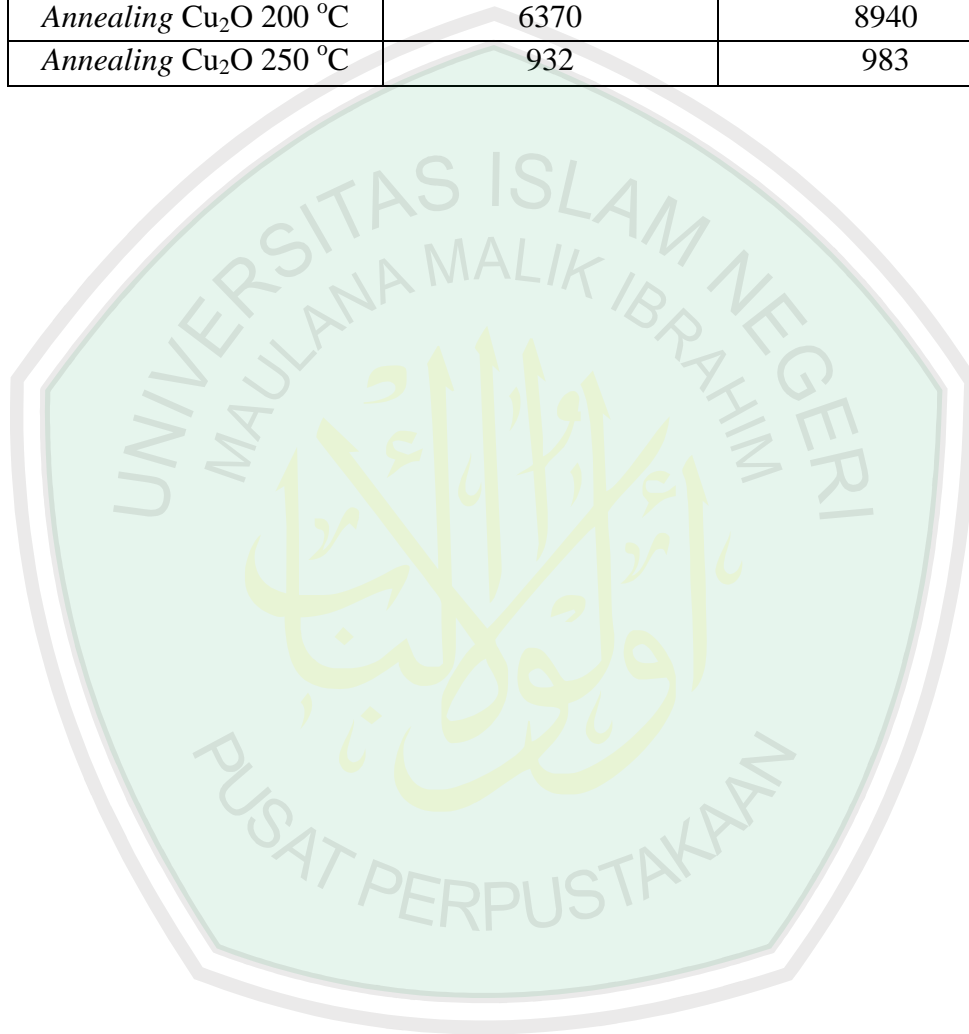
Sample Positioner, "Auto 6"

Data File Name, "SMPL2"

λ (nm)	A (a.u)	λ (nm)	A (a.u)	λ (nm)	A (a.u)	λ (nm)	A (a.u)	λ (nm)	A (a.u)	λ (nm)	A (a.u)
200	****	355	3.96	510	2.671	665	2.355	820	2.205	975	2.067
205	****	360	3.788	515	2.635	670	2.32	825	2.175	980	2.056
210	2.437	365	3.841	520	2.632	675	2.331	830	2.178	985	2.065
215	****	370	3.799	525	2.61	680	2.324	835	2.172	990	2.06
220	2.174	375	3.738	530	2.59	685	2.317	840	2.17	995	2.044
225	****	380	3.608	535	2.556	690	2.315	845	2.157	1000	2.052
230	2.51	385	3.668	540	2.551	695	2.315	850	2.159	1005	2.053
235	2.666	390	3.457	545	2.536	700	2.291	855	2.171	1010	2.049
240	3.308	395	3.433	550	2.535	705	2.285	860	2.148	1015	2.044
245	3.395	400	3.471	555	2.517	710	2.295	865	2.161	1020	2.03
250	3.819	405	3.387	560	2.499	715	2.301	870	2.148	1025	2.053
255	****	410	3.41	565	2.478	720	2.29	875	2.148	1030	2.038
260	4.383	415	3.38	570	2.489	725	2.302	880	2.146	1035	2.036
265	****	420	3.314	575	2.467	730	2.284	885	2.127	1040	2.03
270	4.124	425	3.219	580	2.444	735	2.271	890	2.116	1045	2.034
275	****	430	3.234	585	2.439	740	2.251	895	2.122	1050	2.048
280	****	435	3.187	590	2.434	745	2.272	900	2.122	1055	2.036
285	4.548	440	3.181	595	2.431	750	2.264	905	2.111	1060	2.035
290	4.633	445	3.147	600	2.417	755	2.242	910	2.112	1065	2.072
295	4.54	450	3.117	605	2.412	760	2.243	915	2.115	1070	2.072
300	4.584	455	3.103	610	2.395	765	2.236	920	2.101	1075	2.065
305	4.607	460	3.055	615	2.4	770	2.238	925	2.111	1080	2.074
310	4.485	465	3.022	620	2.394	775	2.232	930	2.099	1085	2.056
315	4.402	470	2.985	625	2.4	780	2.241	935	2.108	1090	2.049
320	4.549	475	2.927	630	2.39	785	2.234	940	2.079	1095	2.065
325	4.217	480	2.905	635	2.379	790	2.207	945	2.086	1100	2.08
330	4.272	485	2.855	640	2.369	795	2.202	950	2.08		
335	4.437	490	2.807	645	2.362	800	2.202	955	2.074		
340	4.208	495	2.775	650	2.357	805	2.211	960	2.083		
345	4.219	500	2.726	655	2.344	810	2.193	965	2.081		
350	4.83	505	2.68	660	2.345	815	2.213	970	2.068		

Lampiran 2. Pengujian Dioda *Heterojunction Solar Cell*

Cu ₂ O/MgO-SnO ₂	R bias maju (kΩ)	R bias mundur (kΩ)
Tanpa <i>annealing</i> Cu ₂ O	0,327	0,228
<i>Annealing</i> Cu ₂ O 100 °C	384	408
<i>Annealing</i> Cu ₂ O 150 °C	0,362	0,368
<i>Annealing</i> Cu ₂ O 200 °C	6370	8940
<i>Annealing</i> Cu ₂ O 250 °C	932	983



Lampiran 3. Pengujian Sifat Listrik *Heterojunction Solar Cell*

Sampel 1

Int (Lux)	R (Ω)	V (V)	I (A)	P (W)	η (%)
23.500	0	0	-	0	0
23.500	1,00E+05	1,00E-04	1,00E-09	1,00E-13	1,26421E-09
23.500	2,00E+05	1,00E-04	5,00E-10	5,00E-14	6,32103E-10
23.500	3,00E+05	2,00E-05	6,67E-11	1,33E-15	1,68561E-11
23.500	4,00E+05	2,00E-04	5,00E-10	1,00E-13	1,26421E-09
23.500	4,70E+05	3,00E-04	6,38E-10	1,91E-13	2,42082E-09
23.500	6,60E+05	3,00E-04	4,55E-10	1,36E-13	1,72392E-09
23.500	8,80E+05	3,00E-04	3,41E-10	1,02E-13	1,29294E-09
23.500	1,00E+06	3,00E-04	3,00E-10	9,00E-14	1,13779E-09
23.500	2,20E+06	4,00E-04	1,82E-10	7,27E-14	9,19423E-10
23.500	∞	5,00E-04	0	0	0

Sampel 2

Int (Lux)	R (Ω)	V (V)	I (A)	P (W)	η (%)
23.500	0	0	-	0	0
23.500	1,00E+05	2,00E-04	2,00E-09	4,00E-13	5,05683E-09
23.500	2,00E+05	2,00E-04	1,00E-09	2,00E-13	2,52841E-09
23.500	3,00E+05	3,00E-04	1,00E-09	3,00E-13	3,79262E-09
23.500	4,00E+05	4,00E-04	1,00E-09	4,00E-13	5,05683E-09
23.500	4,70E+05	4,00E-04	8,51E-10	3,40E-13	4,30368E-09
23.500	6,60E+05	4,00E-04	6,06E-10	2,42E-13	3,06474E-09
23.500	8,80E+05	5,00E-04	5,68E-10	2,84E-13	3,59150E-09
23.500	1,00E+06	6,00E-04	6,00E-10	3,60E-13	4,55114E-09
23.500	2,20E+06	7,00E-04	3,18E-10	2,23E-13	2,81573E-09
23.500	∞	9,00E-04	0	0	0

Sampel 3

Int (Lux)	R (Ω)	V (V)	I (A)	P (W)	η (%)
23.500	0	0	-	0	0
23.500	1,00E+05	8,80E-03	8,80E-08	7,74E-10	9,79002E-06
23.500	2,00E+05	1,36E-02	6,80E-08	9,25E-10	1,16914E-05
23.500	3,00E+05	2,00E-02	6,67E-08	1,33E-09	1,68561E-05
23.500	4,00E+05	2,45E-02	6,13E-08	1,50E-09	1,89710E-05
23.500	4,70E+05	2,70E-02	5,74E-08	1,55E-09	1,96087E-05
23.500	6,60E+05	2,80E-02	4,24E-08	1,19E-09	1,50172E-05
23.500	8,80E+05	3,00E-02	3,41E-08	1,02E-09	1,29294E-05
23.500	1,00E+06	3,14E-02	3,14E-08	9,86E-10	1,24646E-05
23.500	2,20E+06	3,47E-02	1,58E-08	5,47E-10	6,91917E-06
23.500	∞	3,74E-02	0	0	0

Sampel 4

Int (Lux)	R (Ω)	V (V)	I (A)	P (W)	η (%)
23.500	0	0	-	0	0
23.500	1,00E+05	1,00E-04	1,00E-09	1,00E-13	1,26421E-09
23.500	2,00E+05	1,00E-04	5,00E-10	5,00E-14	6,32103E-10
23.500	3,00E+05	1,00E-04	3,33E-10	3,33E-14	4,21402E-10
23.500	4,00E+05	2,00E-04	5,00E-10	1,00E-13	1,26421E-09
23.500	4,70E+05	2,00E-04	4,26E-10	8,51E-14	1,07592E-09
23.500	6,60E+05	2,00E-04	3,03E-10	6,06E-14	7,66186E-10
23.500	8,80E+05	3,00E-04	3,41E-10	1,02E-13	1,29294E-09
23.500	1,00E+06	4,00E-04	4,00E-10	1,60E-13	2,02273E-09
23.500	2,20E+06	6,00E-04	2,73E-10	1,64E-13	2,06870E-09
23.500	∞	1,20E-03	0	0	0

Sampel 5

Int (Lux)	R (Ω)	V (V)	I (A)	P (W)	η (%)
23.500	0	0	-	0	0
23.500	1,00E+05	2,00E-04	2,00E-09	4,00E-13	5,05683E-09
23.500	2,00E+05	4,00E-04	2,00E-09	8,00E-13	1,01137E-08
23.500	3,00E+05	7,00E-04	2,33E-09	1,63E-12	2,06487E-08
23.500	4,00E+05	1,00E-03	2,50E-09	2,50E-12	3,16052E-08
23.500	4,70E+05	1,30E-03	2,77E-09	3,60E-12	4,54576E-08
23.500	6,60E+05	1,90E-03	2,88E-09	5,47E-12	6,91483E-08
23.500	8,80E+05	2,70E-03	3,07E-09	8,28E-12	1,04728E-07
23.500	1,00E+06	3,70E-03	3,70E-09	1,37E-11	1,7307E-07
23.500	2,20E+06	6,80E-03	3,09E-09	2,10E-11	2,65713E-07
23.500	∞	1,31E-02	0	0	0



Lampiran 4. Gambar Penelitian



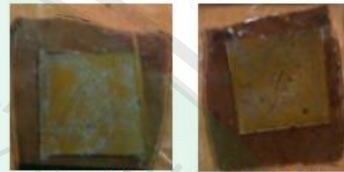
Pengujian Sifat Listrik



Sampel 1
Tanpa *annealing*
Cu₂O

Sampel 2
Annealing Cu₂O
100 °C

Sampel 3
Annealing Cu₂O
150 °C



Sampel 4
Annealing Cu₂O
200 °C

Sampel 5
Annealing Cu₂O
250 °C

Sampel *Heterojunction* Solar Cell



Pembuatan Larutan PVA



Spektrofotometer GENESYS 10S UV-Vis