

PURWARUPA SEL SURYA BERLAPISKAN MATERIAL SENG OKSIDA (ZnO) MENGGUNAKAN METODE DOCTOR BLADE COATING

Kevin Sutanto^{1*}, Budi Harsono², Richie Estrada³, Johansah Liman⁴

^{1,2,3,4} Program Studi Teknik Elektro, Universitas Kristen Krida Wacana; Jl. Tanjung Duren Raya No.4, Tj. Duren Utara, Kecamatan Grogol Petamburan, Kota Jakarta Barat, DKI Jakarta 11470, Indonesia; (021) 5666952.

Keywords:

Sel surya;
Seng oksida (ZnO);
Doctor blade;
PCB;
Optikal;
Elektrikal.

Correspondent Email:

kevin.sutanto@ukrida.ac.id

Abstrak. Kebutuhan akan sumber energi alternatif yang bersih dan berkelanjutan mendorong pengembangan teknologi sel surya, salah satunya dengan memanfaatkan material semikonduktor lapisan tipis. Seng oksida (ZnO) merupakan salah satu kandidat material yang menjanjikan karena memiliki celah pita lebar, transparansi optik tinggi, serta kemudahan dalam proses fabrikasi. Penelitian ini membahas pengembangan purwarupa sel surya berbasis lapisan tunggal ZnO dengan prosedur pelapisan menggunakan metode *doctor blade* pada substrat PCB berpola sisir sebagai elektroda konduktif. Pasta ZnO dengan konsentrasi 40% disintesis dan diaplikasikan secara merata, kemudian dikeringkan untuk membentuk lapisan homogen. Dua variasi celah elektroda, yaitu 1 mm dan 2 mm, digunakan untuk mengevaluasi pengaruh konfigurasi elektroda terhadap kinerja perangkat. Karakterisasi dilakukan secara optikal melalui pengukuran transmitansi dan absorbansi, serta secara elektrik dengan pengujian tegangan keluaran pada kondisi gelap, paparan sinar matahari, dan sumber cahaya buatan. Hasil menunjukkan bahwa lapisan ZnO memiliki absorbansi tinggi pada panjang gelombang 300–500 nm, yang penting dalam proses fotogenerasi muatan. Sementara itu, sel surya dengan celah 2 mm menunjukkan kinerja elektrik lebih baik dibandingkan dengan celah 1 mm, ditandai oleh tegangan bocor lebih rendah dan tegangan keluaran lebih tinggi.



JITET is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

Abstract. The increasing demand for clean and sustainable energy sources has driven the advancement of solar cell technology, including the use of thin-film semiconductor materials. Zinc oxide (ZnO) is a promising candidate due to its wide band gap, high optical transparency, and ease of fabrication. This study presents the development of a single-layer ZnO-based solar cell prototype using the doctor blade coating method on comb-patterned PCB substrates as conductive electrodes. A 40% ZnO paste was synthesized, uniformly applied, and thermally dried to produce a homogeneous thin film. Two electrode gap variations—1 mm and 2 mm—were implemented to evaluate the impact of electrode configuration on device performance. Optical characterization was conducted through transmittance and absorbance measurements, while electrical performance was assessed by measuring output voltage under dark conditions, sunlight exposure, and artificial illumination. The results showed that the ZnO layer exhibited high absorbance in the 300–500 nm wavelength range, crucial for photogenerated charge creation. Additionally, the solar cell with a 2 mm electrode gap demonstrated

superior electrical performance, including lower leakage voltage and higher output voltage.

1. PENDAHULUAN

Keprihatinan terhadap isu lingkungan global serta meningkatnya kebutuhan akan energi, didukung oleh kemajuan teknologi energi terbarukan yang terus berkembang, mendorong pemanfaatan sumber energi alternatif. Salah satu sumber daya alam jangka panjang yang paling melimpah dan ekonomis saat ini adalah energi matahari. Teknologi fotovoltaik menjadi salah satu metode yang efisien dalam mengonversi cahaya matahari menjadi energi listrik melalui sel surya[1].

Dibandingkan dengan sumber energi lainnya, matahari menawarkan ketersediaan yang sangat melimpah. Setiap tahun, sekitar 120.000 terawatt (TW) radiasi surya menyinari permukaan bumi[2]. Sinar matahari dinilai memiliki peluang terbesar dalam mendukung teknologi ramah lingkungan karena sifatnya yang tak terbatas, bebas emisi, tidak memerlukan biaya produksi, dan tersedia secara berkelanjutan[3].

Teknologi fotovoltaik bekerja dengan mengonversi energi cahaya matahari langsung menjadi energi listrik tanpa melalui proses konversi termal. Pada dasarnya, setiap modul PV tersusun atas lapisan-lapisan material semikonduktor[4]. Proses generasi listrik terjadi ketika foton cahaya menumbuk permukaan sel, menciptakan medan listrik internal antar lapisan semikonduktor[5]. Keluaran energi yang dihasilkan berbanding lurus dengan intensitas radiasi matahari yang diterima. Daya listrik DC yang dihasilkan kemudian dapat dikonversi menjadi arus AC melalui inverter untuk keperluan penggunaan langsung atau penyimpanan energi. Aplikasi sel surya yang bermanfaat dapat berupa pembangkit listrik tenaga surya (PLTA) yang merupakan solusi strategis bagi berbagai lapisan masyarakat, baik di daerah perkotaan maupun pedesaan, dalam memenuhi kebutuhan energi bersih yang berkelanjutan sekaligus menjamin ketahanan energi masa depan[6]–[8].

Salah satu material lapisan tipis yang banyak diteliti untuk aplikasi sel surya adalah seng oksida (ZnO). Material ini memiliki potensi besar sebagai lapisan aktif dalam sel surya

karena sifat-sifat unggulannya, seperti celah pita lebar ($\sim 3,3$ eV), transparansi optik tinggi ($\geq 80\%$ pada rentang cahaya tampak), serta mobilitas elektron yang baik ($200\text{--}300\text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$)[9]. Selain itu, ZnO dapat disintesis dengan berbagai metode deposisi, seperti *sol-gel*, *sputtering*, dan *chemical bath deposition* (CBD), dan *doctor blade coating* sehingga menawarkan fleksibilitas dalam fabrikasi[10].

Penelitian ini berfokus pada pengembangan purwarupa sel surya berbasis lapisan tunggal seng oksida (ZnO) yang di deposisi dengan metode *doctor blade*. Sebagai inovasi dalam fabrikasi sel surya, penelitian ini memanfaatkan lapisan tembaga (Cu) pada *printed circuit board* (PCB) komersial yang didesain dengan model sisir sebagai substrator konduktif. Untuk mengevaluasi kinerja sel surya berlapis ZnO ini, dilakukan analisis optikal serta elektrik. Hasil analisis diharapkan menjadi alternatif teknologi sel surya yang menggunakan lapisan tunggal ZnO dan elektroda berbahan dasar PCB.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Purwarupa sel surya berlapis material seng oksida (ZnO) ini membutuhkan beberapa teori-teori pendukung yang akan dijelaskan pada tinjauan pustaka berikut ini.

2.1 Efek Fotovoltaik

Efek fotovoltaik merupakan fenomena konversi langsung energi cahaya menjadi listrik melalui penyerapan foton pada material semikonduktor. Proses ini melibatkan tiga mekanisme utama:

• Penyerapan Foton

Proses fotovoltaik diawali dengan absorpsi foton oleh material semikonduktor. Ketika cahaya dengan energi foton ($h\nu$) yang lebih besar dari energi celah pita (E_g) material ($h\nu \geq E_g$), terjadi eksitasi elektron dari pita valensi ke pita konduksi. Fenomena ini menghasilkan pasangan *elektron-hole* yang terikat secara Coulomb dengan energi ikatan sekitar $10\text{--}100\text{ meV}$ tergantung material[11]. Pada ZnO dengan $E_g \approx 3.3\text{ eV}$, penyerapan optimal terjadi pada panjang gelombang $< 375\text{ nm}$ (daerah UV) [9].

• Pemisahan Muatan

Pada sel surya berbasis lapisan tunggal ZnO, pemisahan muatan terjadi melalui mekanisme yang berbeda dari sel surya konvensional. Ketika pasangan *elektron-hole* terbentuk akibat penyerapan foton, pemisahan muatan terutama difasilitasi oleh:

1. **Medan Listrik Eksternal** dari tegangan luar atau perbedaan *work function* antara elektroda dan ZnO. Elektron akan bergerak menuju elektroda dengan *work function* lebih rendah (biasanya PCB tembaga dengan $\Phi \approx 4.7$ eV), sementara *hole* menuju elektroda berlawanan[12].
2. **Efek Permukaan** pada antarmuka ZnO-elektroda yang menciptakan tingkat energi lokal untuk pemisahan muatan.
3. **Gradasi Konsentrasi Pembawa Muatan** alami akibat distribusi foton yang tidak merata di seluruh lapisan. Daerah dengan intensitas cahaya lebih tinggi akan menghasilkan lebih banyak *elektron-hole*, menciptakan gradasi konsentrasi yang mendorong difusi muatan.

• Koleksi Arus

Elektron dan *hole* yang terpisah mengalir melalui elektroda menuju rangkaian eksternal, menghasilkan arus *photogenerated*. Koleksi arus pada struktur lapisan tunggal mengandalkan:

1. **Transport Muatan Vertikal** dari ZnO ke elektroda melalui:
 - **Drift** akibat medan listrik eksternal kecil (0.1-0.5 V/ μ m).
 - **Difusi** alami dari daerah konsentrasi tinggi (dekat permukaan terang) ke rendah.
2. **Efisiensi Kontak Elektroda** yang ditentukan oleh:
 - *Matching* antara *work function* elektroda dan tingkat energi ZnO.
 - Kualitas antarmuka ZnO/elektroda (resistansi kontak $< 10 \Omega \cdot \text{cm}^2$).
3. **Desain Geometri Sel** dimana:
 - Pola sisir pada PCB mengurangi jarak koleksi elektron.
 - Rasio area terang:gelap mempengaruhi generasi arus.

2.2 Metode Doctor Blade Coating

Doctor blade coating telah muncul sebagai teknik deposisi yang *viable* untuk fabrikasi fotovoltaik area besar. Metode berbasis larutan ini memungkinkan pengendalian ketebalan secara terukur pada rentang 50-500 nm. Studi komparatif menunjukkan film ZnO hasil *doctor blade* memiliki tingkat kekasaran permukaan < 10 nm, sambil mempertahankan sifat optoelektronik yang setara[13].

Doctor blade merupakan salah satu metode deposisi lapisan tipis yang relatif murah, sederhana, dan mudah diterapkan untuk skala laboratorium maupun produksi kecil[14]. Teknik ini melibatkan perataan pasta material secara merata di atas substrat menggunakan bilah datar, sehingga menghasilkan lapisan homogen dengan ketebalan yang dapat dikendalikan. Dalam konteks sel surya, metode ini menjadi alternatif menarik karena tidak memerlukan peralatan vakum atau suhu tinggi, sehingga mendukung pengembangan teknologi yang lebih ekonomis dan berkelanjutan.

2.3 UV-Vis Spectroscopy

Spektroskopi *ultraviolet-visible* (UV-Vis) adalah teknik analisis yang memanfaatkan prinsip hukum Beer-Lambert, dimana cahaya UV (200–400 nm) atau cahaya tampak (400–800 nm) diserap oleh molekul tertentu, menghasilkan absorbansi berbanding lurus dengan konsentrasi, panjang lintasan, dan koefisien ekstingsi molar (ϵ)[15]. Alat UV-Vis tersusun atas sumber cahaya (lampu deuterium/hidrogen untuk UV dan tungsten-halogen untuk cahaya tampak), monokromator (prisma/kisi difraksi), *cuvette* (umumnya kuarsa untuk UV), dan detektor (*photodiode* atau *photomultiplier*). Sampel yang terkena sinar akan menyerap sebagian cahaya, dan berdasarkan rasio intensitas masuk (I_0) dan keluar (I), absorbansi (A) dihitung menggunakan $A = -\log(I/I_0)$, memungkinkan penentuan konsentrasi zat dalam larutan.

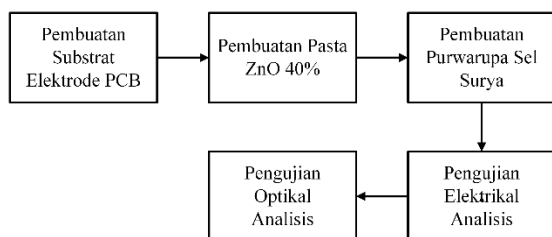
Spektrum UV-Vis memberikan informasi tentang λ_{max} —panjang gelombang dengan absorbansi tertinggi—yang terkait dengan struktur elektronik molekul seperti ikatan p atau n-elektron. Teknik ini bersifat sensitif terhadap kondisi seperti pH, pelarut, dan temperatur; sehingga perlu prosedur yang dikendalikan secara ketat. Kendati demikian, keterbatasan seperti interferensi matriks, penyerakan cahaya, dan deviasi dari linearitas Beer-Lambert (pada

konsentrasi tinggi atau partikel tersuspensi), menuntut validasi metode dan penyesuaian eksperimental[16].

UV-Vis banyak digunakan dalam analisis kuantitatif di bidang farmasi (misalnya pengukuran konsentrasi obat dan pemantauan ion atau polutan dalam air). Di dunia bioteknologi, teknik ini dipakai untuk quantifikasi DNA/protein (absorbansi pada 260 dan 280 nm), serta membaca kinetika reaksi enzimatik. Selain itu, UV-Vis juga diaplikasikan dalam bidang material—forensik, pengendalian kualitas lapisan tipis semikonduktor, dan karakterisasi nanopartikel (seperti *gold* yang menunjukkan puncak tajam khas)—atau digunakan dalam spektrofotometer *online* untuk memantau mutu air dan proses industri secara *real-time*[17].

3. METODE PENELITIAN

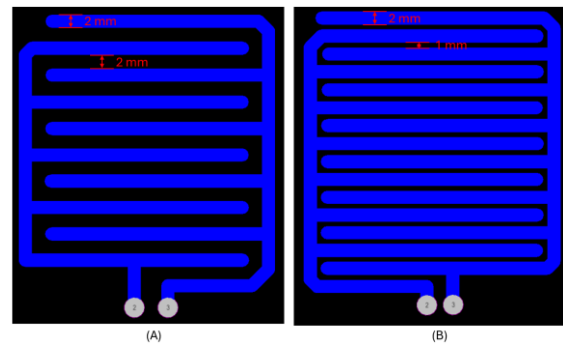
Metode penelitian dalam pembuatan purwarupa sel surya berlapis material seng oksida (ZnO) dengan metode *doctor blade coating* ditunjukkan seperti pada gambar 3.1.



Gambar 3.1 Metode Penelitian Purwarupa Sel Surya

3.1 Pembuatan Substrat Elektrode PCB

Penelitian ini memanfaatkan substrat berbahan dasar papan sirkuit cetak (PCB) yang dilapisi tembaga (Cu) sebagai elektroda. Desain substrat mengikuti pola interdigitasi menyerupai bentuk sisir untuk masing-masing elektroda anoda dan katoda, sebagaimana ditampilkan pada gambar 3.2. Pola sisir ini dirancang menggunakan perangkat lunak Altium Designer dan dicetak pada PCB berukuran 4×4 cm, yang merupakan area pelapisan pasta ZnO. Lebar jalur tembaga pada masing-masing elektroda ditetapkan sebesar 2 mm.



Gambar 3.2 (A) Pola Sisir Sel Surya Celah 2 mm
(B) Pola Sisir Sel Surya Celah 1 mm

Dalam penelitian ini, digunakan dua variasi celah antar elektroda, yaitu 2 mm dan 1 mm. Variasi ini ditujukan untuk mengevaluasi pengaruh lebar celah terhadap kinerja sel surya yang dihasilkan. Dengan mengubah jarak antar elektroda, diharapkan diperoleh pemahaman yang lebih komprehensif mengenai hubungan antara konfigurasi pola elektroda dan efisiensi perangkat fotovoltaiik yang dikembangkan.

Pembuatan substrat PCB dilakukan menggunakan metode konvensional. Proses dimulai dengan mencetak pola elektroda menggunakan *printer inkjet* pada media transfer, yang kemudian dipindahkan ke permukaan papan PCB melalui teknik penyetrakan panas. Setelah pola menempel pada permukaan PCB, proses *etching* dilakukan untuk menghilangkan lapisan tembaga (Cu) yang tidak diinginkan. Proses *etching* ini menggunakan larutan ferit klorida (FeCl_3) sebagai agen pengikis, dengan cara mengaduk atau menggoyangkan larutan secara perlahan untuk mempercepat reaksi kimia dan memastikan hasil pola yang bersih.

3.2 Pembuatan Pasta ZnO dengan Konsentrasi 40%

Pasta ZnO dengan konsentrasi padatan sebesar 40% disiapkan menggunakan bahan berupa serbuk ZnO nanopartikel, polivinil alkohol (PVA) sebagai bahan pengikat (*binder*), polyethylene glycol (PEG 400) sebagai *plasticizer*, serta gliserin sebagai aditif opsional. Air deionisasi digunakan sebagai pelarut utama. Total massa campuran diformulasikan untuk menghasilkan ± 20 gram pasta.

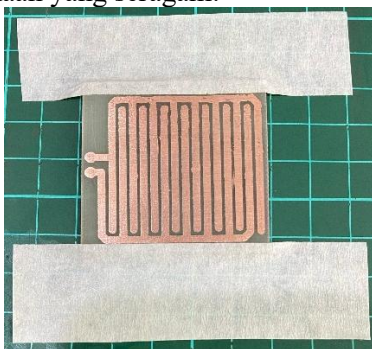
Serbuk ZnO dengan ukuran nanopartikel terlebih dahulu dihaluskan secara manual menggunakan *mortar* dan *pestle* untuk

mencegah adanya aglomerasi partikel selama pencampuran. Sebanyak 1,5 gram PVA (tipe 1788) dilarutkan secara bertahap ke dalam 10 mL air deionisasi yang telah dipanaskan hingga $\pm 80^\circ\text{C}$. Proses pelarutan dilakukan menggunakan *magnetic stirrer* dengan kecepatan 120 rpm hingga PVA larut sempurna dan membentuk larutan kental bening. Setelahnya, larutan didinginkan hingga mencapai suhu ruang.

Setelah dingin, 2,5 gram PEG 400 ditambahkan ke dalam larutan untuk meningkatkan kelenturan dan mengurangi sifat lengket. Sebanyak 0,2 gram gliserin juga ditambahkan untuk menambah fleksibilitas, namun dalam jumlah terbatas agar tidak mengganggu kestabilan sistem. Campuran kemudian diaduk hingga homogen. Serbuk ZnO nanopartikel sebanyak 6 gram kemudian dimasukkan secara bertahap ke dalam campuran sambil terus diaduk kuat hingga seluruh partikel terdispersi merata dan membentuk pasta. Apabila viskositas akhir masih terlalu tinggi, penambahan air dilakukan secara tetes demi tetes hingga diperoleh konsistensi yang sesuai untuk proses pelapisan dengan metode *doctor blade*, dengan tekstur yang tidak terlalu lengket dan tidak menetes.

3.3 Pembuatan Purwarupa Sel Surya

Purwarupa sel surya pada penelitian ini dibuat menggunakan metode *doctor blade* sebagai teknik pelapisan. Substrat berupa elektroda PCB yang telah diproses sebelumnya digunakan sebagai media pelapisan pasta ZnO. Sebelum pelapisan, permukaan PCB dibersihkan terlebih dahulu menggunakan alkohol untuk menghilangkan debu dan kotoran, kemudian permukaannya dihaluskan dengan amplas (*grit 2000*) guna memastikan permukaan yang seragam.



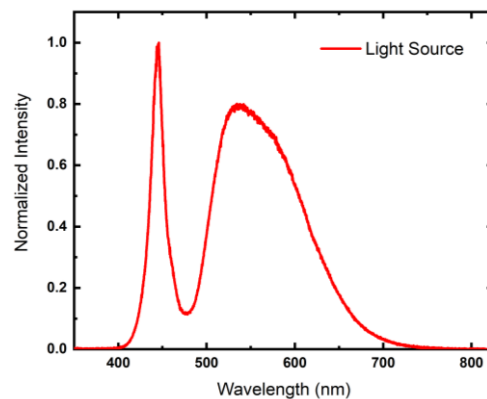
Gambar 3.3 Metode *Doctor Blade* Sampel PCB

Untuk menentukan ketebalan lapisan ZnO secara konsisten, pada sisi kanan dan kiri area pelapisan ditempelkan selotip kertas dengan ketebalan $\pm 100\ \mu\text{m}$ sebagai pembatas, sebagaimana ditunjukkan pada gambar 3.3. Pasta ZnO kemudian diaplikasikan secara merata pada permukaan substrat PCB berukuran $4 \times 4\ \text{cm}$. Sebuah kaca pipih dengan panjang lebih dari 4 cm digunakan sebagai alat penarik (*blade*) untuk meratakan pasta, sehingga diperoleh lapisan tipis ZnO yang tersebar merata di atas permukaan tembaga.

Setelah pelapisan, sampel dikeringkan di dalam *drying oven* (Nabertherm) pada suhu 70°C selama enam jam. Proses pemanasan ini bertujuan untuk menguapkan pelarut dan membantu proses kristalisasi material ZnO pada permukaan elektroda, yang diharapkan dapat meningkatkan kinerja perangkat sel surya.

3.4 Pengujian Elektrikal Analisis

Karakterisasi elektrikal terhadap purwarupa sel surya dilakukan menggunakan multimeter *digital* (Fluke 15B) dengan menghubungkan *probe* positif dan negatif secara langsung ke elektroda anoda dan katoda pada sampel. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengukur tegangan keluaran dari masing-masing sel surya dalam kondisi terpapar dan tidak terpapar cahaya, serta menganalisis pengaruh variasi celah antar elektroda, yaitu 2 mm dan 1 mm, terhadap kinerja perangkat. Pada kondisi sampel terpapar cahaya, pengujian dilakukan dalam dua kondisi pencahayaan berbeda, yakni di bawah paparan sinar matahari langsung dan menggunakan sumber cahaya buatan (*light source*) dengan spektrum yang ditampilkan pada gambar 3.4.



Gambar 3.4 Spektrum *Light Source*

3.5 Pengujian Optik Analisis

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik optik dari material lapisan tipis ZnO yang telah disintesis. Pengukuran dilakukan menggunakan sumber cahaya Ocean Optics DH-2000-BAL, yang terdiri dari lampu deuterium dan halogen. Spektrometer yang digunakan dalam pengujian ini adalah Ocean Optics USB 4000, sebagaimana ditunjukkan pada gambar 3.5.



Gambar 3.5 (A) Light Source DH-2000-BAL
(B) Spektrometer USB 4000 Ocean Optics

Analisis optik dilakukan melalui pengukuran transmitansi lapisan tipis ZnO dalam rentang panjang gelombang 285–850 nm. Pasta ZnO yang telah disiapkan sebelumnya dideposisikan pada kaca preparat berukuran 1×1 cm menggunakan metode *doctor blade*. Selanjutnya, lapisan tipis ZnO dikeringkan dalam oven pengering (Nabertherm) pada suhu 70 °C selama enam jam.

Data transmitansi yang diperoleh kemudian dikonversi menjadi nilai absorbansi menggunakan persamaan berikut:

$$\text{Abs} = 2 - \log(T) \quad (1)$$

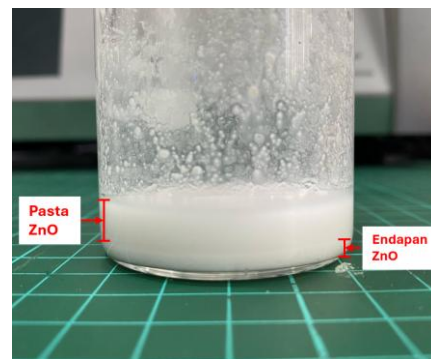
dimana T adalah nilai transmitansi dan Abs merupakan absorbansi dari lapisan ZnO[18]. Melalui analisis spektrum absorbansi ini, dapat diperoleh informasi mengenai panjang gelombang cahaya yang paling banyak diserap oleh lapisan tipis ZnO, sehingga karakteristik optiknya dapat dipahami lebih lanjut.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Purwarupa sel surya berlapiskan seng oksida (ZnO) ini dan pengukuran telah dijelaskan pada bagian metode penelitian. Hasil rancangan, pengujian, serta analisa hasil akan dijelaskan pada beberapa sub-bab berikut ini.

4.1 Hasil Pembuatan Pasta ZnO

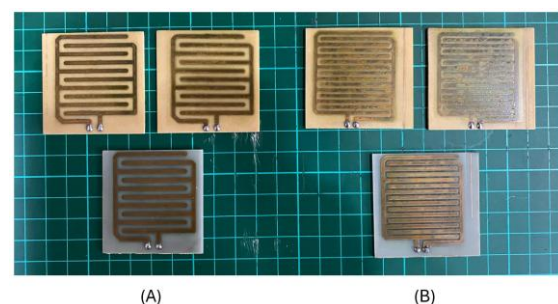
Hasil pembuatan pasta ZnO dengan konsentrasi 40% ditunjukkan pada gambar 4.1. Pasta ZnO yang dihasilkan memiliki viskositas yang memadai untuk diaplikasikan pada permukaan PCB menggunakan metode *doctor blade*. Meskipun demikian, pasta tersebut menunjukkan adanya sedikit endapan, yang kemungkinan disebabkan oleh karakteristik nanopartikel ZnO yang cenderung sulit terdispersi secara sempurna. Untuk proses pelapisan sebagai lapisan aktif pada sel surya, bagian pasta yang digunakan adalah lapisan atas yang tidak mengandung partikel endapan, guna memastikan distribusi material yang lebih homogen pada permukaan substrat.



Gambar 4.1 Hasil Pembuatan Pasta ZnO

4.2 Hasil Purwarupa Sel Surya

Hasil purwarupa sel surya dengan dua variasi celah elektroda, yaitu 2 mm dan 1 mm, ditampilkan pada gambar 4.2. Jumlah total sampel yang digunakan dalam pengujian adalah dua belas buah, terdiri dari enam sampel dengan celah elektroda 2 mm dan enam sampel lainnya dengan celah 1 mm. Konektor anoda dan katoda pada sel surya dilapisi dengan timah sebagai material konduktif untuk mempermudah proses pengambilan data selama pengujian karakteristik elektrik.

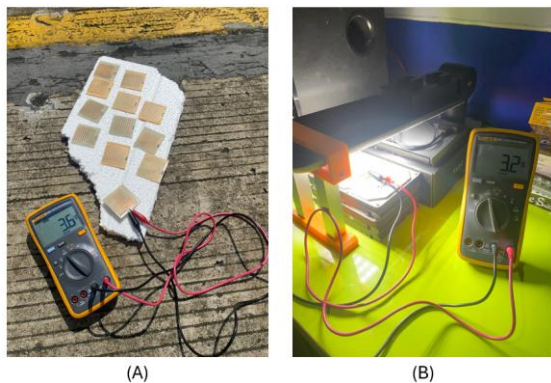


Gambar 4.2 Hasil Purwarupa Sel Surya
(A) Celah 2 mm (B) 1 mm

Lapisan ZnO yang telah dideposisikan menunjukkan tingkat homogenitas yang tinggi, ditandai dengan penyebaran lapisan yang merata pada permukaan substrat serta tidak terdeteksinya partikel ZnO yang tertinggal atau menggumpal. Sel surya hasil fabrikasi kemudian diuji lebih lanjut melalui karakterisasi optikal dan elektrik guna memperoleh pemahaman yang komprehensif mengenai kinerja dan efisiensi dari masing-masing konfigurasi celah elektroda.

4.3 Hasil Pengujian Elektrikal Sel Surya

Pengujian elektrik terhadap sel surya dengan dua variasi celah elektroda dilakukan di bawah dua kondisi pencahayaan, yaitu paparan sinar matahari langsung dan paparan dari sumber cahaya buatan, seperti yang terlihat pada gambar 4.3.



Gambar 4.3 (A) Pengukuran dibawah Cahaya Matahari (B) Pengukuran dibawah Sumber Cahaya Buatan

Tabel 4.1. Hasil Pengujian Elektrikal Sampel Celah 2 mm dibawah Cahaya Matahari

Nomor Sampel	Kondisi Gelap	Paparan Cahaya Matahari	Paparan Sumber Cahaya Buatan
1	0,2 mV	3,6 mV	3,8 mV
2	0,3 mV	2,1 mV	1,8 mV
3	0,5 mV	1,7 mV	2,4 mV
4	0,4 mV	1,8 mV	2,1 mV
5	0,6 mV	2,2 mV	2,0 mV
6	0,2 mV	2,5 mV	2,2 mV
$\bar{X}$	0,36 mV	2,31 mV	2,38 mV

Hasil pengujian elektrik sampel sel surya menggunakan multimeter pada dua kondisi pencahayaan—yaitu di bawah sinar matahari langsung dan di bawah sumber cahaya buatan—disajikan pada Tabel 4.1 dan Tabel 4.2. Tabel 4.1 menampilkan hasil pengukuran untuk sampel dengan celah elektroda 2 mm, sedangkan Tabel 4.2 memuat data untuk sampel dengan celah 1 mm.

Tabel 4.2. Hasil Pengujian Elektrikal Sampel Celah 1 mm dibawah Sumber Cahaya Buatan

Nomor Sampel	Kondisi Gelap	Paparan Cahaya Matahari	Paparan Sumber Cahaya Buatan
1	1 mV	1,8 mV	2,5 mV
2	1,2 mV	2,8 mV	3,1 mV
3	0,6 mV	1,5 mV	2,3 mV
4	0,6 mV	2,2 mV	2,1 mV
5	0,7 mV	1,4 mV	1,8 mV
6	0,9 mV	1,5 mV	1,7 mV
$\bar{X}$	0,83 mV	1,86 mV	2,25 mV

Pada kondisi tanpa pencahayaan, rata-rata tegangan bocor yang ditunjukkan oleh sampel dengan celah elektroda 2 mm adalah sebesar **0,36 mV**, sedangkan sampel dengan celah 1 mm menunjukkan rata-rata sebesar **0,83 mV**. Nilai ini menunjukkan bahwa celah elektroda yang lebih sempit cenderung meningkatkan kebocoran arus saat tidak ada pencahayaan. Hal ini dapat disebabkan oleh efek medan listrik internal (*built-in electric field*) yang lebih lemah pada konfigurasi celah 1 mm. Ketika jarak antara elektroda sempit, gradien potensial yang terbentuk juga menjadi lebih kecil, sehingga tidak cukup kuat untuk menahan atau mengarahkan pergerakan muatan yang tidak diinginkan. Akibatnya, arus bocor lebih mudah terjadi karena tidak ada gaya dorong internal yang signifikan untuk mengarahkan pembawa muatan ke arah yang seharusnya.

Sebaliknya, pada celah elektroda 2 mm, jarak antar elektroda yang lebar memungkinkan terbentuknya medan listrik internal yang lebih kuat. Medan ini berperan penting dalam menahan dan mengarahkan pergerakan muatan,

bahkan dalam kondisi tanpa cahaya, sehingga cenderung menekan tegangan bocor.

Di bawah paparan sinar matahari langsung, sel surya dengan celah 2 mm menghasilkan rata-rata tegangan sebesar **2,31 mV**, sementara konfigurasi 1 mm menghasilkan rata-rata **1,86 mV**. Hasil ini mengindikasikan bahwa medan listrik internal yang dihasilkan oleh celah 2 mm berpotensi untuk menekan arus bocor dan mampu membantu proses pemisahan pasangan *elektron-hole* dari energi foton yang diserap. Lebih lanjut, hal ini berdampak pada efisiensi dari aliran pembawa muatan, sehingga mengurangi kemungkinan rekombinasi sebelum mencapai terminal.

Selain itu, celah yang lebih lebar juga menggambarkan jalur pergerakan pembawa muatan yang luas, sehingga memungkinkan difusi dan *drift* yang lebih optimal. Efek gabungan antara medan internal yang lebih besar dan area aktif yang lebih luas mendukung peningkatan efisiensi konversi energi cahaya menjadi listrik.

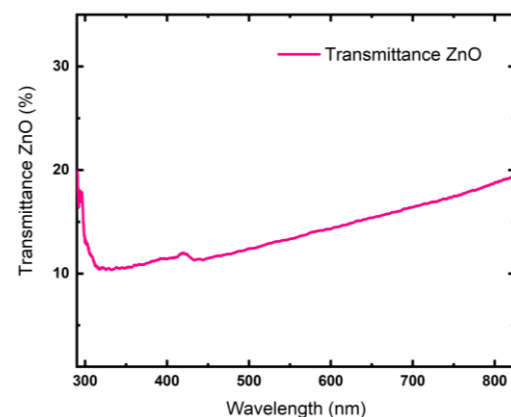
Hasil pengukuran di bawah sumber cahaya buatan menunjukkan tren yang serupa. Rata-rata tegangan keluaran pada celah 2 mm adalah **2,38 mV**, sedikit lebih tinggi dibandingkan dengan **2,25 mV** pada celah 1 mm. Meskipun intensitas dan spektrum sumber cahaya buatan lebih terbatas dibandingkan sinar matahari, efek medan listrik internal tetap memainkan peran penting. Pada celah yang lebih lebar, medan internal yang terbentuk memberikan percepatan tambahan bagi pembawa muatan, sehingga meskipun jumlah pasangan *elektron-hole* yang dihasilkan lebih sedikit, efisiensi pemisahan dan pengalirannya tetap lebih baik dibandingkan pada celah sempit.

Berdasarkan hasil eksperimen dan interpretasi fisik, dapat disimpulkan bahwa konfigurasi elektroda dengan celah 2 mm memiliki keunggulan dalam aspek elektrik, baik pada kondisi gelap maupun terang. Peran medan listrik internal yang lebih besar pada celah yang lebih lebar terbukti mampu meningkatkan kemampuan pemisahan muatan, mengurangi kebocoran arus, dan menghasilkan tegangan keluaran yang lebih tinggi.

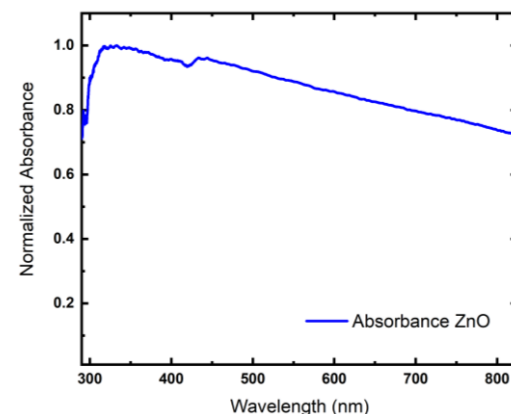
4.4 Hasil Pengujian Optik Sel Surya

Hasil pengukuran optikal terhadap lapisan tipis ZnO dengan konsentrasi 40% ditunjukkan pada gambar 4.4 dan 4.5. Grafik transmitansi

pada gambar 4.4 menunjukkan bahwa lapisan ZnO memiliki tingkat transmitansi yang rendah pada rentang panjang gelombang 300–500 nm, yakni sekitar 10–20%. Transmitansi ini kemudian meningkat secara bertahap hingga mendekati 25% pada panjang gelombang sekitar 800 nm. Hal ini mengindikasikan bahwa lapisan ZnO menyerap sebagian besar cahaya pada wilayah *ultraviolet* (UV) hingga awal spektrum cahaya tampak, dan mulai menjadi lebih transparan di wilayah panjang gelombang yang lebih tinggi, khususnya di sekitar wilayah *near-infrared* (NIR).



Gambar 4.4 Transmitansi ZnO Konsentrasi 40%



Gambar 4.5 Absorbansi ZnO Konsentrasi 40%

Konversi transmitansi ke absorbansi, seperti yang diperlihatkan pada gambar 4.5, menunjukkan nilai absorbansi yang tinggi di awal spektrum, dengan puncak absorbansi berada pada rentang 300–500 nm. Setelah melewati 500 nm, absorbansi menurun secara perlahan, yang menunjukkan bahwa efisiensi penyerapan cahaya menurun pada panjang gelombang yang lebih panjang. Absorbansi

tinggi di wilayah UV dan awal cahaya tampak ini sangat mendukung kinerja lapisan ZnO dalam menangkap energi foton dari cahaya matahari, sehingga sangat penting dalam proses pembangkitan pasangan *elektron-hole* yang akan digunakan sebagai sumber arus dalam sel surya.

Karakteristik optikal ini mengonfirmasi bahwa ZnO pada konsentrasi 40% memiliki sifat sebagai material semikonduktor transparan dengan kemampuan penyerapan cahaya yang dominan di spektrum energi tinggi (UV dan biru). Hal ini menjadikan lapisan ZnO sesuai untuk diaplikasikan sebagai lapisan aktif atau lapisan penyangga (*buffer layer*) dalam struktur sel surya, terutama dalam menangkap energi dari foton yang memiliki energi tinggi. Kemampuan menyerap cahaya secara efisien di awal spektrum sangat penting dalam menunjang proses pembangkitan pasangan *elektron-hole*, yang pada akhirnya dapat dimanfaatkan untuk proses konversi energi dalam perangkat fotovoltaik. Selain itu, meningkatnya transmitansi pada panjang gelombang yang lebih tinggi juga memberi keuntungan jika ZnO digunakan dalam struktur berlapis, karena memungkinkan cahaya dengan energi lebih rendah diteruskan ke lapisan berikutnya.

Secara keseluruhan, hasil pengujian optikal menunjukkan bahwa lapisan tipis ZnO dengan konsentrasi 40% memiliki profil serapan dan transmisi yang mendukung penggunaannya dalam aplikasi sel surya berbasis lapisan tipis. Penyerapan yang tinggi pada wilayah UV dan cahaya tampak awal memberikan potensi besar dalam pemanfaatan spektrum matahari secara efisien, terutama bila dikombinasikan dengan arsitektur sel surya multi-lapisan atau tandem.

Secara keseluruhan, lapisan tipis ZnO 40% menunjukkan karakteristik optikal yang mendukung aplikasi sel surya, dengan kemampuan serapan cahaya tinggi pada spektrum utama sinar matahari. Oleh karena itu, pengendalian kualitas lapisan ZnO dan desain geometri elektroda merupakan faktor penting dalam optimasi kinerja sel surya berbasis lapisan tipis.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian, lapisan tipis ZnO dengan konsentrasi 40% berhasil dibuat dan menunjukkan karakteristik optikal yang

mendukung aplikasi sel surya. Absorbansi tinggi pada panjang gelombang 300–500 nm menunjukkan kemampuan lapisan ZnO dalam menyerap cahaya di wilayah UV dan awal cahaya tampak dengan baik, yang penting untuk proses pembangkitan muatan. Sementara itu, meningkatnya transmitansi pada panjang gelombang lebih besar membuka peluang untuk aplikasi *multilayer*, dimana lapisan ZnO dapat berfungsi sebagai lapisan penyangga yang meneruskan cahaya ke lapisan berikutnya.

Purwarupa sel surya dengan celah elektroda 2 mm menunjukkan kinerja elektrik yang lebih baik dibandingkan variasi 1 mm, ditunjukkan oleh tegangan keluaran yang lebih tinggi dan tegangan bocor yang lebih rendah. Hal ini menunjukkan bahwa kombinasi antara kualitas lapisan ZnO yang baik dan konfigurasi elektroda yang tepat berpengaruh signifikan terhadap efisiensi perangkat. Dengan demikian, pengendalian proses pembuatan lapisan dan desain fisik elektroda menjadi aspek penting dalam pengembangan sel surya berbasis ZnO.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. S. Al-Ezzi and M. N. M. Ansari, "Photovoltaic Solar Cells: A Review," *Appl. Syst. Innov.*, vol. 5, no. 4, pp. 1–17, 2022, doi: 10.3390/asi5040067.
- [2] G. Li, S. Shittu, T. M. O. Diallo, M. Yu, X. Zhao, and J. Ji, "A review of solar photovoltaic-thermoelectric hybrid system for electricity generation," *Energy*, vol. 158, pp. 41–58, 2018, doi: 10.1016/j.energy.2018.06.021.
- [3] A. F. de Paulo and G. S. Porto, "Evolution of collaborative networks of solar energy applied technologies," *J. Clean. Prod.*, vol. 204, pp. 310–320, 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.08.344.
- [4] N. Rathore, N. L. Panwar, F. Yettou, and A. Gama, "A comprehensive review of different types of solar photovoltaic cells and their applications," *Int. J. Ambient Energy*, vol. 42, no. 10, pp. 1200–1217, 2021, doi: 10.1080/01430750.2019.1592774.
- [5] M. V. Dambhare, B. Butey, and S. V. Moharil, "Solar photovoltaic technology: A review of different types of solar cells and its future trends," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1913, no. 1, 2021, doi: 10.1088/1742-6596/1913/1/012053.
- [6] F. Fahrurrozi, G. A. Buntoro, and J. S. Habiby, "Rancang bangun pembangkit listrik sistem hybrid tenaga air dan surya dengan sistem kontrol berbasis Arduino," *J. Inform. dan Tek.*

- Elektro Terap.*, vol. 13, no. 2, pp. 672–681, Apr. 2025, doi: 10.23960/jitet.v13i2.6300.
- [7] R. A. Kurniawan, A. Triyanto, W. A. Nurtiyanto, and J. Juhana, “Rancang bangun panes surya 100 WP untuk sumber listrik smart hidroponik di perumahan pesona cilebut 1,” *J. Inform. dan Tek. Elektro Terap.*, vol. 13, no. 2, pp. 965–974, Apr. 2025, doi: 10.23960/jitet.v13i2.6375.
- [8] R. Febriyan, M. Fatkhurrohman, and I. Irwanto, “Trainer pembangkit listrik tenaga surya berbasis IoT pada mata pelajaran instalasi penerangan listrik di sekolah menengah kejuruan,” *J. Inform. dan Tek. Elektro Terap.*, vol. 13, no. 2, Apr. 2025, doi: 10.23960/jitet.v13i2.6217.
- [9] Ü. Özgür *et al.*, “A comprehensive review of ZnO materials and devices,” *J. Appl. Phys.*, vol. 98, no. 4, Aug. 2005, doi: 10.1063/1.1992666.
- [10] Z. L. Wang, “Zinc oxide nanostructures: Growth, properties and applications,” *J. Phys. Condens. Matter*, vol. 16, no. 25, 2004, doi: 10.1088/0953-8984/16/25/R01.
- [11] P. Würfel, *Physics of Solar Cells*. Wiley, 2005.
- [12] S. Sharma, S. C. Bhandari, S. P. Shrestha, and L. P. Joshi, “Synthesis and study of zinc oxide nanoparticles for dye sensitized solar cell,” *Res. J. Phys. Sci.*, vol. 5, no. 5, pp. 6–10, 2017.
- [13] K. Magiswaran *et al.*, “Controlling the Layer Thickness of Zinc Oxide Photoanode and the Dye-Soaking Time for an Optimal-Efficiency Dye-Sensitized Solar Cell,” *Coatings*, vol. 13, no. 1, pp. 1–16, 2023, doi: 10.3390/coatings13010020.
- [14] G. Ji *et al.*, “12.88% efficiency in doctor-blade coated organic solar cells through optimizing the surface morphology of a ZnO cathode buffer layer,” *J. Mater. Chem. A*, vol. 7, no. 1, pp. 212–220, 2019, doi: 10.1039/c8ta08873j.
- [15] Z. Shi, C. W. K. Chow, R. Fabris, J. Liu, and B. Jin, “Applications of Online UV-Vis Spectrophotometer for Drinking Water Quality Monitoring and Process Control: A Review,” *Sensors*, vol. 22, no. 8, pp. 1–21, 2022, doi: 10.3390/s22082987.
- [16] V. Cerdà, P. Phansi, and S. Ferreira, “From mono- to multicomponent methods in UV-VIS spectrophotometric and fluorimetric quantitative analysis – A review,” *TrAC - Trends Anal. Chem.*, vol. 157, 2022, doi: 10.1016/j.trac.2022.116772.
- [17] M. Arif, H. Raza, and T. Akhter, “UV-Vis spectroscopy in the characterization and applications of smart microgels and metal nanoparticle-decorated smart microgels: a critical review,” *RSC Adv.*, vol. 14, no. 51, pp. 38120–38134, 2024, doi: 10.1039/D4RA07643E.
- [18] R. Estrada, J. Liman, B. Harsono, and I. Karnadi, “Characterization of small molecule-based organic photodetectors for non-fullerene bulk heterojunction with strong response in the visible light region,” *Results Eng.*, vol. 25, p. 104009, 2025, doi: 10.1016/j.rineng.2025.104009.