Pengaruh Temperatur Substrat FTO dan Konsentrasi Prekursor ZnO:Mg terhadap Performa Solar Cell Heterojunction Cu_2O/ZnO

Marfitra. S*[1], Lety Trisnaliani[2], Iriani Reka Septiana[3]
Politeknik Negeri Sriwijaya[1,2,3]
*e-mail: 062240412382@student.polsri.ac.id

ABSTRAK

Energi surya merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang memiliki potensi besar untuk dikembangkan sebagai alternatif pemenuhan kebutuhan energi listrik yang ramah lingkungan. Salah satu teknologi yang terus dikembangkan adalah *solar cell heterojunction* berbasis Cu_2O/ZnO/FTO yang memanfaatkan kombinasi material semikonduktor tipe-p dan tipe-n untuk meningkatkan proses pemisahan serta transport pembawa muatan. Performa perangkat sangat dipengaruhi oleh kualitas lapisan penyusun yang dipengaruhi oleh parameter fabrikasi. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi temperatur pemanasan substrat FTO dan konsentrasi larutan prekursor ZnO terhadap performa *solar cell heterojunction* Cu_2O/ZnO/FTO serta mengevaluasi efisiensi konversi energi yang dihasilkan. Lapisan ZnO dideposisikan menggunakan metode *spray pyrolysis* pada temperatur 425°C, 450°C, 475°C, dan 500°C dengan variasi konsentrasi larutan ZnO sebesar 0,3 M:0,03 M; 0,4 M:0,04 M; dan 0,5 M:0,05 M. Selanjutnya, lapisan Cu_2O dibentuk menggunakan metode *electrodeposition* sehingga diperoleh struktur *heterojunction* Cu_2O/ZnO/FTO. Karakterisasi dilakukan melalui pengukuran parameter keluaran listrik yang meliputi *open-circuit voltage* (Voc), *short-circuit current* (Isc), daya keluaran (P), *power density* (Parea), dan efisiensi konversi energi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi temperatur pemanasan substrat dan konsentrasi larutan ZnO berpengaruh terhadap peningkatan karakteristik listrik solar cell. Kondisi optimum diperoleh pada konsentrasi ZnO 0,5 M:0,05 M dengan temperatur pemanasan 500°C yang menghasilkan nilai *open-circuit voltage* sebesar 120,5 mV, *short-circuit current* sebesar 145,8 mA, daya keluaran sebesar 17,57 mW, *power density* sebesar 0,234 mW/cm², dan efisiensi konversi energi sebesar 0,35%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan temperatur pemanasan substrat yang dipadukan dengan konsentrasi larutan prekursor ZnO yang tepat mampu menghasilkan lapisan ZnO dengan kualitas yang lebih baik sehingga meningkatkan performa *solar cell heterojunction* Cu_2O/ZnO/FTO.

Kata kunci : *Solar Cell; Heterojunction; Cu_2O/ZnO/FTO; Spray Pyrolisis.*

ABSTRACT

Solar energy is one of the most promising renewable energy sources that can be developed as an environmentally friendly alternative for electricity generation. One of the emerging technologies is the Cu_2O/ZnO/FTO heterojunction solar cell, which utilizes the combination of p-type and n-type semiconductor materials to improve charge carrier separation and transport. The performance of the device is strongly influenced by the quality of its constituent layers, which is determined by the fabrication parameters. Therefore, this study aims to analyze the effect of FTO substrate heating temperature and ZnO precursor solution concentration on the performance of Cu_2O/ZnO/FTO heterojunction solar cells, as well as to evaluate their energy conversion efficiency. The ZnO layer was deposited using the spray pyrolysis method at substrate heating temperatures of 425°C, 450°C, 475°C, and 500°C with ZnO precursor solution concentrations of 0.3 M:0.03 M, 0.4 M:0.04 M, and 0.5 M:0.05 M. Subsequently, the Cu_2O layer was fabricated using the electrodeposition method to form the Cu_2O/ZnO/FTO heterojunction structure. The electrical performance was characterized by measuring the open-circuit voltage (Voc), short-circuit current (Isc), output power (P), power density (Parea), and energy conversion efficiency. The results indicate that both the substrate heating temperature and the ZnO precursor solution concentration significantly affect the electrical characteristics of the solar cells. The optimum performance was achieved at a ZnO concentration of 0.5 M:0.05 M and a substrate heating temperature of 500°C, yielding an open-circuit voltage of 120.5 mV, a short-circuit current of 145.8 mA, an output power of 17.57 mW, a power density of 0.234 mW/cm², and an energy conversion efficiency of 0.35%. These findings demonstrate that increasing the substrate

heating temperature combined with an appropriate ZnO precursor solution concentration improves the quality of the ZnO layer, thereby enhancing the performance of Cu_2O/ZnO/FTO heterojunction solar cells.

Keywords **:** *Solar Cell; Heterojunction; Cu_2O/ZnO/FTO; Spray Pyrolysis.*

PENDAHULUAN

Energi listrik memiliki peranan yang sangat penting dalam menunjang berbagai aktivitas manusia, mulai dari kebutuhan rumah tangga hingga operasional pada sektor industri dan perkembangan teknologi. Peningkatan konsumsi energi yang terus berlangsung hingga saat ini masih didominasi oleh pemanfaatan sumber energi fosil, seperti minyak bumi, gas alam, dan batu bara (Alnavis et al., 2024). Ketergantungan yang tinggi terhadap sumber energi tersebut menimbulkan sejumlah persoalan, terutama berkaitan dengan keterbatasan ketersediaan cadangan energi fosil serta dampak negatif terhadap lingkungan akibat proses eksploitasi dan penggunaannya. Dengan demikian, pengembangan energi terbarukan menjadi langkah strategis yang perlu terus dilakukan guna menjamin keberlangsungan sistem penyediaan energi pada masa mendatang.

Energi surya merupakan salah satu bentuk energi terbarukan yang memiliki prospek pengembangan sangat besar sebagai alternatif pemenuhan kebutuhan energi di masa mendatang. Potensi tersebut semakin relevan bagi Indonesia yang secara geografis berada di wilayah ekuator dan terdiri atas wilayah kepulauan yang luas, sehingga memperoleh paparan sinar matahari dalam jumlah melimpah sepanjang tahun. Hal ini sejalan dengan data dalam Rencana Umum Energi Nasional (RUEN) yang menunjukkan bahwa kapasitas total potensi energi terbarukan di Indonesia mencapai 443 GW, dengan sekitar 208 GW di antaranya berasal dari pemanfaatan energi surya (Silalahi et al., 2021).

Nilai rata-rata *global horizontal irradiation* (GHI) di Indonesia mencapai 4,8 kWh/m² per hari, yang menunjukkan tingkat intensitas radiasi surya relatif tinggi. Angka tersebut tercatat lebih besar dibandingkan beberapa negara yang telah lebih dahulu mengembangkan teknologi energi surya, seperti Jerman dengan 2,9 kWh/m² per hari, Jepang sebesar 3,6 kWh/m² per hari, serta China yang memiliki rata-rata 4,1 kWh/m² per hari. Kondisi ini menunjukkan bahwa Indonesia memiliki keunggulan geografis yang signifikan dalam mendukung optimalisasi pemanfaatan energi surya sebagai sumber energi terbarukan (Silalahi et al., 2021). Pemanfaatan solar *photovoltaic* (PV) di Indonesia hingga saat ini masih belum sebanding dengan besarnya potensi energi surya yang dimiliki. Tercatat bahwa sampai pertengahan tahun 2023, kapasitas terpasang PLTS nasional baru mencapai sekitar 322,6 MW, atau masih kurang dari 1% dari total potensi yang tersedia. Untuk mendorong peningkatan kontribusi energi surya dalam sistem ketenagalistrikan nasional, pemerintah telah menetapkan sasaran pengembangan kapasitas solar PV sebesar 5 GW pada tahun 2030. Realisasi target tersebut mensyaratkan adanya penambahan kapasitas sekitar 0,7 GW per tahun secara konsisten (Silalahi & Gunawan, n.d.). Ketidaksesuaian antara besarnya potensi energi surya dan tingkat realisasi pemanfaatannya mengindikasikan bahwa Indonesia masih membutuhkan inovasi dalam pengembangan teknologi sel surya yang tidak hanya efisien, tetapi juga memiliki biaya produksi yang lebih ekonomis. Di sisi lain, pada skala global, kebutuhan untuk mempercepat transisi menuju energi bersih semakin mendesak seiring dengan terus meningkatnya emisi gas rumah kaca yang dihasilkan dari pemanfaatan bahan bakar fosil. Kondisi tersebut tercermin dari emisi CO_2 global sektor energi yang pada tahun 2023 mencapai angka tertinggi, yaitu sekitar 37,4 miliar ton, meningkat sebesar 1,1% dibandingkan tahun sebelumnya (Efe-onakpojeruo et al., 2024).

Pemanfaatan energi surya sebagai sumber pembangkit listrik dapat dilakukan melalui penerapan teknologi *photovoltaic* atau sel surya, yang bekerja dengan mengonversi energi cahaya menjadi energi listrik. Proses konversi tersebut berlangsung melalui mekanisme efek *photovoltaic* yang terjadi pada material semikonduktor ketika menerima paparan cahaya (Al-Ezzi & Ansari, 2022). Pada sistem *photovoltaic*, material semikonduktor memiliki fungsi utama sebagai medium penyerap energi foton sekaligus penghasil pasangan pembawa muatan berupa elektron dan hole. Muatan yang terbentuk tersebut selanjutnya mengalami proses pemisahan sehingga dapat menghasilkan aliran arus listrik yang dimanfaatkan sebagai keluaran energi. Beragam studi telah dilakukan untuk mengeksplorasi serta mengembangkan material semikonduktor alternatif yang berpotensi diaplikasikan pada fabrikasi sel surya dengan biaya produksi yang lebih ekonomis. Salah satu sistem material yang banyak dikaji dalam pengembangan sel surya adalah *heterojunction* Cu_2O/ZnO. Pada konfigurasi ini, *Copper*(I) *oxide* (Cu_2O) berfungsi sebagai

semikonduktor tipe-p dengan nilai *band gap* berkisar antara 2,0–2,2 eV, sedangkan ZnO berperan sebagai semikonduktor tipe-n yang memiliki *band gap* lebar, yaitu sekitar 3,2–3,4 eV. Konfigurasi tersebut memungkinkan proses penyerapan cahaya berlangsung secara optimal pada wilayah spektrum tampak melalui peran Cu_2O, sementara ZnO mendukung perpindahan elektron secara efisien. Karakteristik ini menjadikan kombinasi keduanya memiliki potensi besar untuk dikembangkan sebagai struktur *heterojunction* p–n pada perangkat sel surya berbasis oksida transparan.

Performa keseluruhan perangkat sel surya sangat dipengaruhi oleh kualitas substrat FTO yang berfungsi sebagai elektroda depan. Hasil studi komparatif yang dilakukan oleh (Ramírez-amador et al., n.d.). menunjukkan bahwa kondisi fabrikasi, terutama pada aspek rasio F/Sn serta metode penyemprotan yang digunakan, memberikan pengaruh signifikan terhadap karakteristik lapisan FTO yang dihasilkan melalui teknik *Spray pyrolysis*, meliputi tingkat kristalinitas, nilai transmitansi optik, dan konduktivitas listrik (Ramírez-amador et al., n.d.). Penelitian yang dilakukan oleh (Li et al., 2024). semakin menegaskan bahwa struktur sel surya berbasis FTO/ZnO/Cu_2O yang difabrikasi menggunakan metode *electrochemical deposition* tanpa proses vakum tetap mampu menghasilkan perangkat fotovoltaik yang berfungsi dengan baik. Hal tersebut ditunjukkan melalui capaian nilai *open-circuit voltage* sebesar 195 mV, yang sekaligus mengindikasikan efektivitas antarmuka ZnO/Cu_2O dalam mendukung proses ekstraksi elektron secara selektif (Li et al., 2024).

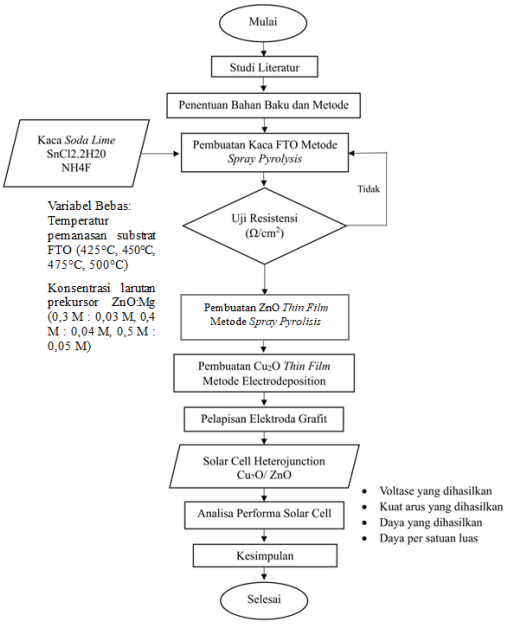
Penelitian sebelumnya yang dilakukan, (Wang et al., 2023) mengembangkan sel surya *heterojunction* Cu_2O/Ti/ITO, dengan lapisan Cu_2O yang difabrikasi menggunakan metode *low-cost Electrodeposition* , sedangkan deposisi lapisan *Ti buffer* dan ITO dilakukan melalui teknik *sputtering* . Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa penambahan *buffer layer Ti* setebal 10 nm mampu meningkatkan efisiensi konversi daya dari 1,78% menjadi 2,54%. Peningkatan ini mengindikasikan bahwa struktur *heterojunction* Cu_2O berbasis oksida transparan, yang pada penelitian tersebut menggunakan substrat kaca ITO, memiliki performa fotovoltaik yang lebih unggul dibandingkan konfigurasi Cu_2O konvensional. Meskipun demikian, penelitian (Wang et al., 2023) masih menghadapi keterbatasan dari sisi proses fabrikasi. Penggunaan metode *sputtering* untuk deposisi lapisan Ti dan ITO menuntut ketersediaan sistem vakum, material khusus, serta biaya operasional yang relatif tinggi. Di samping itu, penerapan lapisan logam tipis sebagai *buffer layer* turut meningkatkan kompleksitas fabrikasi karena menambah jumlah tahapan proses. Kondisi tersebut dinilai kurang efisien untuk pengembangan perangkat pada skala laboratorium pendidikan maupun penelitian terapan dengan fasilitas yang terbatas. Oleh sebab itu, diperlukan pendekatan fabrikasi yang lebih sederhana, ekonomis, dan tetap mampu menghasilkan kualitas *junction* yang baik.

Berdasarkan keterbatasan tersebut, penelitian ini dikembangkan menggunakan struktur *heterojunction* Cu_2O/ZnO/FTO berbasis *solid-state* melalui kombinasi metode *Spray pyrolysis* dan *Electrodeposition* . Perbedaan utama dibandingkan penelitian (Wang et al., 2023) terletak pada pemanfaatan ZnO sebagai semikonduktor tipe-n yang berperan sebagai *electron transport layer*. Penggunaan material ini diharapkan mampu menggantikan mekanisme optimasi antarmuka yang pada penelitian sebelumnya diperoleh melalui penambahan *buffer layer Ti*, sehingga proses fabrikasi menjadi lebih sederhana tanpa mengurangi kualitas performa *junction* yang dihasilkan (Li et al., 2024). Pemanfaatan ZnO didasarkan pada karakteristik materialnya yang memiliki *band gap* lebar, mobilitas elektron yang tinggi, serta kemampuan membentuk *junction* yang baik ketika dikombinasikan dengan Cu_2O. Sifat-sifat tersebut menjadikan ZnO berpotensi mendukung proses *transport* elektron secara efektif sekaligus meningkatkan kualitas antarmuka pada struktur *heterojunction* . Dari sisi metodologi, penerapan teknik *Spray pyrolysis* dalam pembentukan lapisan FTO juga didukung oleh berbagai penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa metode ini mampu menghasilkan lapisan dengan kualitas *optoelektronik* yang baik melalui proses fabrikasi yang relatif sederhana dan ekonomis (Saehana et al., 2025), penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa pembentukan kaca FTO pada temperatur 450°C dengan konsentrasi larutan 0,7 M mampu menghasilkan kualitas lapisan yang optimal, yang ditunjukkan oleh nilai resistensi sebesar 40 Ω/cm^2. Sementara itu, pemanfaatan metode *Electrodeposition* untuk sintesis lapisan ZnO dan Cu_2O juga telah banyak didukung oleh berbagai studi terdahulu (Najah et al., 2025).

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan selama 3 bulan, dimulai pada bulan April – Juni 2026. Kegiatan penelitian di Laboratorium Teknik Energi, Program Studi D-IV Teknik Energi, Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Sriwijaya. Alat yang digunakan dalam penelitian ini meliputi kompor gas beserta tabung gas sebagai sumber pemanas, plat besi berdiameter 18 cm dengan ketebalan 20 mm, power supply adjustable, termometer digital, dan hot plate untuk mendukung proses pemanasan serta pengendalian suhu selama penelitian. Selain itu, digunakan elektroda grafit, spray gun, solder, dan gerinda dalam proses pembuatan serta perakitan sampel. Pengukuran parameter listrik dilakukan menggunakan multimeter digital, sedangkan intensitas cahaya diukur menggunakan luxmeter. Untuk menunjang proses isolasi dan pengukuran sifat material, penelitian ini juga menggunakan glass wool dan pH meter. Bahan yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas kaca dengan ketebalan 2 mm sebagai substrat, timah klorida dihidrat ($SnCl_2 \cdot 2H_2O$), amonium fluorida (NH_4F), etanol 96%, zinc acetate [$Zn(CH_3COO)_2$], tembaga sulfat ($CuSO_4$), asam laktat [$CH_3CH(OH)COOH$], magnesium acetate [$Mg(CH_3COO)_2$], serbuk grafit, natrium silikat (Na_2SiO_3), aquadest, natrium hidroksida (NaOH), siku aluminium, kabel tembaga, serta selotip isolator. Seluruh bahan tersebut digunakan sesuai dengan fungsinya masing-masing dalam proses sintesis, pelapisan, perakitan, dan pengujian sampel selama pelaksanaan penelitian.

Metode yang digunakan pada penelitian adalah metode eksperimen (percobaan), yang meliputi proses pembuatan panel surya melalui beberapa tahapan, yaitu pembuatan kaca FTO *glass*, pembentukan lapisan ZnO, pembentukan lapisan Cu_2O, serta pembentukan lapisan elektroda grafit. Pengumpulan data dilakukan melalui pengukuran langsung terhadap parameter listrik berupa tegangan dan arus. Selain itu, melakukan observasi terhdap karakteristik lapisan yang terbentuk. Data yang diperoleh selama penelitian selanjutnya dianalisis menggunakan metode statistika sederhana dan disajikan dalam bentuk tabel serta grafik untuk memudahkan interpretasi hasil. Analisis dilakukan secara bertahap, dimulai dari proses pembuatan kaca Fluorine-doped Tin Oxide (FTO) sebagai substrat konduktif transparan. Tahap berikutnya adalah pembentukan lapisan ZnO sebagai lapisan semikonduktor tipe-n, kemudian dilanjutkan dengan pembentukan lapisan Cu_2O sebagai semikonduktor tipe-p. Setelah kedua lapisan semikonduktor berhasil dibentuk, dilakukan pembentukan lapisan elektroda grafit sebagai elektroda penghantar pada perangkat yang dibuat. Seluruh hasil pengukuran pada setiap tahapan proses kemudian dikumpulkan, diolah, dan dianalisis berdasarkan parameter penelitian. Hasil analisis tersebut selanjutnya disajikan dalam bentuk tabel dan grafik untuk memberikan gambaran yang jelas mengenai karakteristik serta kinerja sampel yang dihasilkan.



Gambar 1. Diagram Alir Proses Penelitian

Proses pembuatan kaca Fluorine-doped Tin Oxide (FTO) diawali dengan membersihkan kaca berukuran 5 × 15 cm menggunakan aseton 99% untuk menghilangkan kotoran dan kontaminan pada permukaan kaca. Selanjutnya disiapkan larutan $SnCl_2 \cdot 2H_2O$–NH_4F berkonsentrasi 0,8 M sebanyak 20 mL

sebagai prekursor pelapisan. Kaca yang telah dibersihkan kemudian diletakkan di atas plat grafit yang dipanaskan menggunakan kompor gas hingga mencapai suhu 500°C. Setelah suhu tercapai, larutan prekursor disemprotkan secara merata ke permukaan kaca sebanyak 20 mL menggunakan metode *spray pyrolysis*. Setelah proses pelapisan selesai, kaca didinginkan secara perlahan menggunakan *glass wool* hingga mencapai suhu ruang untuk mencegah terjadinya retak akibat perubahan suhu yang terlalu cepat.

Pembuatan lapisan ZnO dilakukan dengan terlebih dahulu menyiapkan larutan $Zn(CH_3COO)_2$ dan $Mg(CH_3COO)_2$ dengan variasi konsentrasi sebesar 0,3 M : 0,03 M, 0,4 M : 0,04 M, dan 0,5 M : 0,05 M, masing-masing sebanyak 7,5 mL. Kaca FTO yang telah dibuat sebelumnya diletakkan di atas plat grafit yang dipanaskan menggunakan kompor gas hingga mencapai variasi suhu 425°C, 450°C, 475°C, dan 500°C. Setelah suhu yang diinginkan tercapai, larutan ZnO disemprotkan secara merata ke permukaan kaca FTO sebanyak 7,5 mL. Sampel yang telah dilapisi kemudian didinginkan secara perlahan di atas *glass wool* hingga mencapai suhu ruang.

Lapisan Cu_2O dibuat melalui metode elektrodeposisi. Larutan elektrolit disiapkan dengan melarutkan 12 g $CuSO_4$ dan 18 g asam laktat ke dalam 900 mL aquadest. Selanjutnya larutan ditambahkan NaOH secara bertahap hingga mencapai pH 11, kemudian dipanaskan menggunakan *hot plate* sampai suhu 60°C. Pada proses elektrodeposisi, kutub negatif *power supply* dihubungkan ke substrat kaca FTO, sedangkan kutub positif dihubungkan ke elektroda grafit. Tegangan diatur sebesar 5 V dengan kuat arus 0,5 A, kemudian proses deposisi dilakukan selama 30 menit. Setelah proses selesai, substrat diangkat dan dipanaskan kembali menggunakan *hot plate* pada suhu 60°C selama 30 menit untuk meningkatkan kualitas lapisan Cu_2O yang terbentuk.

Pelapisan elektroda grafit diawali dengan mencampurkan natrium silikat 40% sebanyak 10 g dengan serbuk grafit sebanyak 25 g hingga membentuk pasta yang homogen. Sebelum pelapisan dilakukan, bagian tepi kaca ditutup menggunakan selotip isolator dengan jarak sekitar 5 mm dari setiap sisi untuk membatasi area pelapisan. Pasta grafit kemudian dioleskan secara merata pada permukaan kaca dan diratakan hingga sejajar dengan permukaan selotip. Setelah pelapisan selesai, selotip dilepaskan sehingga diperoleh batas lapisan yang rapi. Sampel selanjutnya dipanaskan menggunakan *hot plate* pada suhu 50°C selama 60 menit untuk mengeringkan dan menguatkan lapisan elektroda grafit.

Tahap pengamatan dilakukan dengan meletakkan sel surya (*solar cell*) yang telah dibuat sejajar dengan lux meter di ruang terbuka yang memperoleh penyinaran matahari secara langsung tanpa adanya bayangan yang menutupi permukaan sel surya. Selanjutnya dilakukan pengukuran tegangan dan kuat arus yang dihasilkan menggunakan multimeter digital, sementara intensitas cahaya dicatat menggunakan lux meter. Prosedur pengukuran yang sama diterapkan pada setiap sampel sel surya dengan memastikan posisi sel surya dan lux meter tetap sama pada setiap pengujian agar kondisi pengukuran konsisten. Data tegangan dan arus yang diperoleh kemudian digunakan untuk menghitung daya listrik yang dihasilkan oleh masing-masing sel surya sebagai dasar evaluasi terhadap kinerja perangkat yang telah dibuat.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Penelitian

Data hasil pengukuran terhadap 12 sampel *solar cell heterojunction* Cu_2O/ZnO/FTO yang telah difabrikasi. Data yang diperoleh meliputi tegangan rangkaian terbuka (Voc) dan arus hubung singkat (Isc) sebagai parameter utama performa perangkat. Berdasarkan hasil pengukuran tersebut kemudian dilakukan perhitungan daya keluaran (P) dan daya per satuan luas (P_{area}) untuk mengevaluasi pengaruh variasi temperatur pemanasan substrat *Fluorine-Doped Tin Oxide* dan konsentrasi larutan prekursor ZnO:Mg terhadap performa *solar cell* yang dihasilkan.

Hasil Pengukuran Parameter Listrik

Pengukuran parameter listrik dilakukan terhadap dua belas sampel *solar cell heterojunction* Cu_2O/ZnO/FTO yang difabrikasi berdasarkan kombinasi 3 variasi konsentrasi larutan prekursor ZnO:Mg (K1, K2, dan K3) serta 4 variasi temperatur pemanasan substrat *Fluorine-Doped Tin Oxide* (425°C, 450°C, 475°C, dan 500°C). Pengujian dilakukan di bawah penyinaran cahaya matahari langsung menggunakan multimeter digital. Selama proses pengujian, intensitas cahaya diukur menggunakan *lux meter* untuk memastikan kondisi pencahayaan pada saat pengambilan data. Data yang diperoleh meliputi tegangan

rangkaian terbuka (*open-circuit voltage*, Voc) dan arus hubung singkat (*short-circuit current*, Isc). Selanjutnya, berdasarkan hasil pengukuran tersebut dilakukan perhitungan daya keluaran (P) dan daya per satuan luas (P_{area}) sebagai parameter untuk mengevaluasi performa *solar cell* yang dihasilkan. Data hasil pengukuran disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Data Hasil Pengukuran Solar Cell

Konsentrasi Larutan	Suhu (°C)	Luas Kaca (cm^2)	Ev (Lux)	Voc (mV)	Isc (mA)
K1 (0,3M : 0,03M)	425	75	81700	34,2	16,1
	450	75	82300	66,7	31,9
	475	75	80900	48,5	24,7
	500	75	79600	42,3	47,8
K2 (0,4M : 0,04M)	425	75	80200	12,4	25,9
	450	75	82800	70,6	52,3
	475	75	81500	63,8	93,2
	500	75	83200	60,1	16,8
K3 (0,5M : 0,05M)	425	75	84100	43,7	36,5
	450	75	80400	64,9	79,4
	475	75	83600	79,8	133,1
	500	75	81000	120,5	145,8

Keterangan konsentrasi larutan:
K1 = $Zn(CH_3COO)_2$ 0,3 M : $Mg(CH_3COO)_2$ 0,03 M;
K2 = $Zn(CH_3COO)_2$ 0,4 M : $Mg(CH_3COO)_2$ 0,04 M;
K3 = $Zn(CH_3COO)_2$ 0,5 M : $Mg(CH_3COO)_2$ 0,05 M;

Perhitungan Parameter Keluaran Listrik Solar Cell

Berdasarkan data hasil pengukuran pada Tabel 1, dilakukan perhitungan parameter keluaran listrik yang meliputi daya keluaran (P) dan daya per satuan luas (P_{area}) untuk setiap sampel *solar cell heterojunction* Cu_2O/ZnO/FTO. Daya keluaran dihitung menggunakan persamaan $P = V_{oc} \times I_{sc}$, sedangkan daya per satuan luas dihitung dengan membagi daya keluaran terhadap luas aktif *solar cell* sebesar 75 cm^2. Hasil perhitungan tersebut disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Perhitungan Parameter Keluaran Listrik *Solar cell*

Konsentrasi Larutan	Suhu (°C)	Voc (mV)	Isc (mA)	P = (mW)	A (cm^2)	P_{area} (mW/cm^2)
K1 (0,3M : 0,03M)	425	34,2	16,1	0,551	75	0,007
	450	66,7	31,9	2,128	75	0,028
	475	48,5	24,7	1,198	75	0,016
	500	42,3	47,8	2,022	75	0,027
K2 (0,4M : 0,04M)	425	12,4	25,9	0,321	75	0,004
	450	70,6	52,3	3,692	75	0,049
	475	63,8	93,2	5,946	75	0,079
	500	60,1	16,8	1,01	75	0,013
K3 (0,5M : 0,05M)	425	43,7	36,5	1,595	75	0,021
	450	64,9	79,4	5,153	75	0,069
	475	79,8	133,1	10,62	75	0,142
	500	120,5	145,8	17,57	75	0,234

Keterangan:
V_{oc} = Tegangan rangkaian terbuka (mV)
I_{sc} = Kuat arus hubung singkat (mA)
P = Daya keluaran (mW)
A = Luas penampang aktif *solar cell* (cm^2)
P_{area} = Daya per satuan luas (mW/cm^2)

Efisiensi Konversi Energi solar cell

Efisiensi konversi energi (η) merupakan parameter yang menunjukkan kemampuan *solar cell* dalam mengubah energi cahaya yang diterima menjadi energi listrik. Nilai efisiensi diperoleh dari perbandingan antara daya keluaran (*output power*, P_{out}) dengan daya cahaya yang diterima oleh permukaan aktif perangkat (*input power*, P_{in}). Semakin tinggi nilai efisiensi yang diperoleh, semakin baik kemampuan perangkat dalam

mengonversi energi cahaya menjadi energi listrik. Perhitungan efisiensi dilakukan menggunakan persamaan berikut.

$$\eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \times 100\%$$

Daya masukan cahaya (P_{in}) ditentukan berdasarkan intensitas cahaya yang diukur menggunakan *lux meter* selama proses pengujian. Nilai intensitas cahaya yang masih dalam satuan lux kemudian dikonversi menjadi W/m² menggunakan faktor konversi sebesar 0,00820 W/m² per lux sesuai referensi (Michael et al., 2020), kemudian dikalikan dengan luas aktif panel sebesar 75 cm² (0,0075 m²). Hasil perhitungan efisiensi untuk seluruh sampel disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Perhitungan Efisiensi Konversi Energi *Solar cell*

Variasi Konsentrasi	Suhu Pemanasan (°C)	Ev (Lux)	G (W/m²)	Pin (mW)	Pout (mW)	η (%)
K1	425	81.700	669,7	5023	0,55	0,01
	450	82.300	674,6	5059	2,13	0,04
	475	80.900	663,1	4973	1,20	0,02
	500	79.600	652,5	4893	2,02	0,04
K2	425	80.200	657,4	4930	0,32	0,01
	450	82.800	678,7	5090	3,69	0,07
	475	81.500	668	5010	5,95	0,12
	500	83.200	682	5115	1,01	0,02
K3	425	84.100	689,3	5170	1,60	0,03
	450	80.400	659	4943	5,15	0,10
	475	83.600	685,2	5139	10,62	0,21
	500	81.000	663,9	4980	17,57	0,35

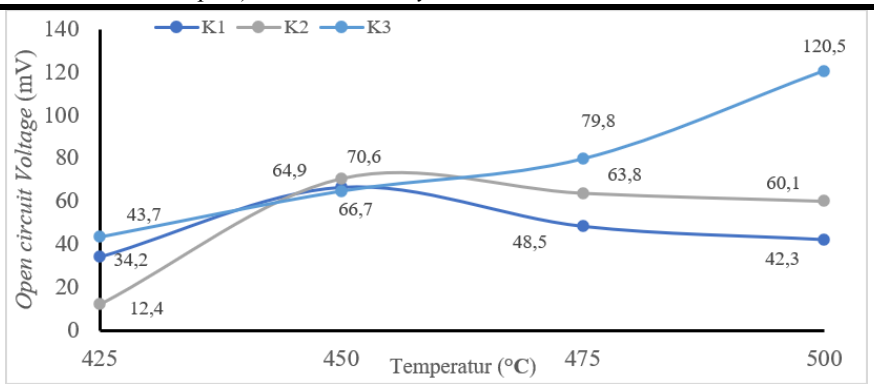
Keterangan:
Ev = Intensitas cahaya (Lux)
G = Iradiasi cahaya (W/m²)
Pin = Daya masukan cahaya (mW)
Pout = Daya keluaran *solar cell* (mW)
η = Efisiensi konversi energi (%)

Pembahasan

Pengaruh Variasi Temperatur Pemanasan dan Konsentrasi larutan Prekursor ZnO:Mg terhadap Perfoma Solar cell Heterojunction Cu_2O/ZnO/FTO

Temperatur pemanasan substrat dan konsentrasi larutan prekursor ZnO merupakan dua parameter penting dalam proses fabrikasi lapisan ZnO menggunakan metode *spray pyrolysis*. Variasi temperatur pemanasan memengaruhi proses dekomposisi termal larutan prekursor $Zn(CH_3COO)_2$ dan $Mg(CH_3COO)_2$ sehingga berpengaruh terhadap pembentukan lapisan ZnO pada substrat FTO. Di sisi lain, variasi konsentrasi larutan prekursor ZnO menentukan jumlah material yang terdeposisi pada permukaan substrat, sehingga memengaruhi ketebalan, homogenitas, dan kualitas lapisan yang terbentuk. Penambahan Mg ke dalam lapisan ZnO berperan sebagai material pendoping yang dapat memodifikasi sifat listrik dan optik lapisan ZnO, sehingga diharapkan mampu meningkatkan proses transport elektron. Kombinasi kedua parameter tersebut berperan dalam membentuk lapisan ZnO sebagai *electron transport layer* pada struktur *heterojunction* Cu_2O/ZnO/FTO.

Kualitas lapisan ZnO:Mg yang dihasilkan akan memengaruhi proses pemisahan dan transport elektron sehingga berdampak pada performa *solar cell*. Performa tersebut dievaluasi melalui parameter tegangan rangkaian terbuka (*open-circuit voltage*, Voc), arus hubung singkat (*short-circuit current*, Isc), daya keluaran (*output power*, P), dan daya per satuan luas (*power density*, Parea). Oleh karena itu, pada subbab ini dianalisis pengaruh variasi temperatur pemanasan substrat dan konsentrasi larutan prekursor ZnO:Mg terhadap keempat parameter tersebut. Hubungan antara kedua parameter fabrikasi dengan nilai Voc, Isc, P, dan Parea disajikan pada Gambar 2 hingga Gambar 5 sebagai dasar analisis performa *solar cell heterojunction* Cu_2O/ZnO/FTO.



Gambar 2. Pengaruh Temperatur Pemanasan Substrat dan Konsentrasi larutan terhadap Tegangan Rangkaian Terbuka (Open-Circuit Voltage, Voc)

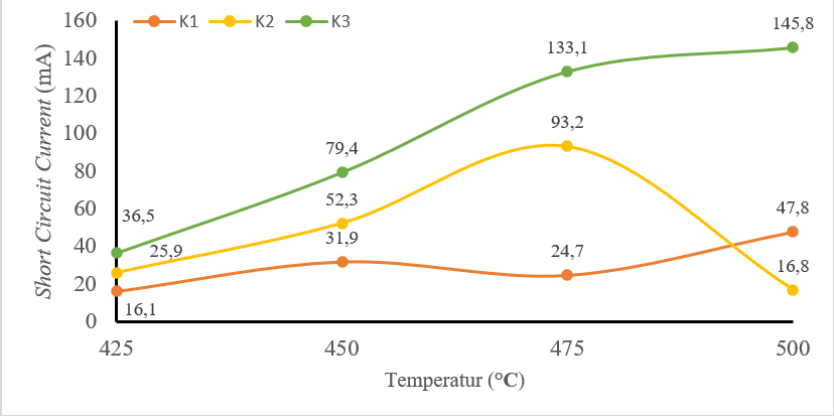
Berdasarkan Gambar 2, nilai tegangan rangkaian terbuka (*open-circuit voltage*, Voc) menunjukkan kecenderungan yang berbeda pada setiap variasi temperatur pemanasan substrat dan konsentrasi larutan prekursor ZnO. Pada konsentrasi K1 (0,3 M:0,03 M), nilai Voc meningkat dari 34,2 mV pada temperatur 425°C menjadi 66,7 mV pada 450°C, kemudian menurun menjadi 48,5 mV pada 475°C dan 42,3 mV pada 500°C. Pola yang hampir serupa juga terlihat pada konsentrasi K2 (0,4 M:0,04 M), di mana nilai Voc meningkat dari 12,4 mV pada 425°C menjadi 70,6 mV pada 450°C, kemudian mengalami sedikit penurunan menjadi 63,8 mV pada 475°C dan 60,1 mV pada 500°C. Sementara itu, pada konsentrasi K3 (0,5 M:0,05 M), nilai Voc meningkat secara bertahap seiring kenaikan temperatur pemanasan substrat, yaitu dari 43,7 mV pada temperatur 425°C menjadi 64,9 mV pada 450°C, meningkat menjadi 79,8 mV pada 475°C, hingga mencapai nilai tertinggi sebesar 120,5 mV pada temperatur 500°C.

Peningkatan nilai Voc pada temperatur tertentu menunjukkan bahwa temperatur pemanasan substrat berpengaruh terhadap kualitas lapisan ZnO yang terbentuk selama proses *spray pyrolysis*. Temperatur yang lebih tinggi meningkatkan proses dekomposisi prekursor sehingga pembentukan lapisan ZnO menjadi lebih sempurna, menghasilkan lapisan yang lebih homogen, memiliki kristalinitas yang lebih baik, serta mengurangi jumlah cacat struktur yang dapat menjadi pusat rekombinasi pembawa muatan. Kondisi tersebut memungkinkan terjadinya pemisahan elektron dan hole yang lebih efektif sehingga tegangan rangkaian terbuka yang dihasilkan menjadi lebih tinggi. Hasil ini sejalan dengan penelitian (Salim et al., 2023) yang melaporkan bahwa peningkatan temperatur deposisi berpengaruh terhadap kualitas lapisan ZnO hasil *spray pyrolysis*, serta penelitian (Cuadra et al., 2023) yang menunjukkan bahwa temperatur deposisi merupakan salah satu faktor utama yang menentukan sifat optik dan listrik lapisan ZnO.

Meskipun demikian, pengaruh temperatur tidak menunjukkan kecenderungan yang sama pada seluruh variasi konsentrasi larutan prekursor. Pada konsentrasi K1 dan K2, nilai Voc mencapai kondisi optimum pada temperatur 450°C, kemudian mengalami penurunan ketika temperatur dinaikkan menjadi 475°C dan 500°C. Penurunan tersebut mengindikasikan bahwa temperatur yang terlalu tinggi pada konsentrasi prekursor yang relatif rendah dapat menyebabkan pertumbuhan lapisan menjadi kurang optimum sehingga meningkatkan peluang terjadinya rekombinasi pembawa muatan. Sebaliknya, pada konsentrasi K3 nilai Voc terus meningkat hingga temperatur 500°C. Hal ini menunjukkan bahwa konsentrasi prekursor yang lebih tinggi masih memerlukan energi termal yang lebih besar agar proses pembentukan lapisan ZnO berlangsung secara optimal.

Kecenderungan tersebut juga didukung oleh penelitian (Najah et al., 2025) yang menyatakan bahwa parameter proses fabrikasi, khususnya temperatur deposisi dan kondisi pembentukan lapisan ZnO, memberikan pengaruh langsung terhadap karakteristik listrik perangkat FTO/ZnO/Cu_2O. Selain itu, (Tran et al., 2018) melaporkan bahwa peningkatan kualitas antarmuka *heterojunction* Cu_2O/ZnO mampu meningkatkan nilai *open-circuit voltage* karena berkurangnya rekombinasi pembawa muatan pada daerah antarmuka. Oleh karena itu, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa kombinasi temperatur pemanasan substrat sebesar 500°C dan konsentrasi larutan K3 (0,5 M:0,05 M) menghasilkan nilai Voc tertinggi, yaitu sebesar 120,5 mV, yang mengindikasikan kualitas lapisan ZnO dan antarmuka *heterojunction* yang lebih baik dibandingkan variasi lainnya.

Meskipun demikian, nilai tegangan rangkaian terbuka (*open-circuit voltage*, Voc) belum dapat digunakan sebagai satu-satunya parameter untuk menilai performa suatu perangkat solar cell. Nilai Voc hanya menggambarkan beda potensial maksimum yang dihasilkan perangkat ketika tidak terdapat aliran arus. Oleh karena itu, diperlukan analisis terhadap arus hubung singkat (*short-circuit current*, Isc) untuk mengevaluasi kemampuan perangkat dalam menghasilkan arus listrik akibat penyinaran. Hubungan antara temperatur pemanasan substrat dengan nilai Isc pada setiap variasi konsentrasi larutan prekursor ZnO disajikan pada Gambar 3.



Gambar 3. Pengaruh Temperatur Pemanasan Substrat dan konsentrasi larutan terhadap Arus Hubung Singkat (Short-Circuit Current, Isc)

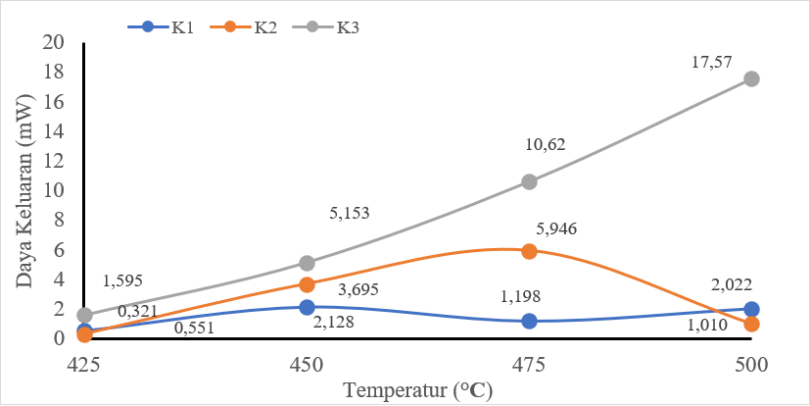
Berdasarkan Gambar 3, nilai arus hubung singkat (*short-circuit current*, Isc) menunjukkan perubahan yang cukup signifikan akibat variasi temperatur pemanasan substrat pada setiap konsentrasi larutan prekursor ZnO. Pada konsentrasi K1 (0,3 M:0,03 M), nilai Isc meningkat dari 16,1 mA pada temperatur 425°C menjadi 31,9 mA pada 450°C, kemudian menurun menjadi 24,7 mA pada 475°C dan kembali meningkat menjadi 47,8 mA pada 500°C. Pada konsentrasi K2 (0,4 M:0,04 M), nilai Isc meningkat dari 25,9 mA pada 425°C menjadi 52,3 mA pada 450°C, kemudian mencapai 93,2 mA pada 475°C, namun mengalami penurunan yang cukup tajam menjadi 16,8 mA pada temperatur 500°C. Sementara itu, pada konsentrasi K3 (0,5 M:0,05 M), nilai Isc meningkat secara konsisten seiring kenaikan temperatur, yaitu dari 36,5 mA pada 425°C menjadi 79,4 mA pada 450°C, meningkat menjadi 133,1 mA pada 475°C, dan mencapai nilai tertinggi sebesar 145,8 mA pada temperatur 500°C.

Peningkatan nilai Isc pada sebagian besar variasi temperatur menunjukkan bahwa temperatur pemanasan substrat berpengaruh terhadap kemampuan lapisan ZnO dalam mengumpulkan dan mentransportasikan elektron yang dihasilkan akibat penyinaran. Temperatur deposisi yang lebih tinggi umumnya menghasilkan lapisan ZnO dengan kristalinitas yang lebih baik serta kontak antarmuka yang lebih baik dengan lapisan Cu_2O, sehingga hambatan terhadap transport elektron menjadi lebih kecil. Kondisi tersebut memungkinkan lebih banyak pasangan elektron-hole yang berhasil dipisahkan dan dikumpulkan sebagai arus listrik, sehingga nilai Isc meningkat. Hasil ini sejalan dengan penelitian (Salim et al., 2023) yang melaporkan bahwa peningkatan temperatur deposisi mampu memperbaiki kualitas film ZnO hasil *spray pyrolysis*, serta (Cuadra et al., 2023) yang menyatakan bahwa sifat listrik lapisan ZnO sangat dipengaruhi oleh kondisi deposisinya.

Namun demikian, peningkatan temperatur tidak selalu menghasilkan nilai Isc yang lebih tinggi. Hal ini terlihat pada konsentrasi K2, di mana nilai Isc meningkat hingga temperatur 475°C, tetapi menurun secara signifikan pada temperatur 500°C. Fenomena tersebut mengindikasikan bahwa temperatur yang terlalu tinggi pada konsentrasi prekursor tertentu dapat menyebabkan pertumbuhan lapisan menjadi kurang optimum, sehingga meningkatkan kemungkinan terbentuknya cacat struktur atau ketidaksempurnaan antarmuka yang menghambat proses transport elektron. Sebaliknya, pada konsentrasi K3 peningkatan temperatur hingga 500°C masih mampu meningkatkan nilai Isc secara konsisten. Hal ini menunjukkan bahwa kombinasi konsentrasi prekursor yang lebih tinggi dengan temperatur pemanasan yang lebih tinggi menghasilkan pembentukan lapisan ZnO yang lebih baik sehingga proses pemisahan dan pengumpulan pembawa muatan berlangsung lebih efektif.

Hasil tersebut juga didukung oleh penelitian (Najah et al., 2025) yang menunjukkan bahwa parameter fabrikasi, khususnya temperatur deposisi, memberikan pengaruh yang signifikan terhadap karakteristik listrik perangkat FTO/ZnO/Cu_2O. Selain itu, (Tran et al., 2018) menjelaskan bahwa kualitas antarmuka *heterojunction* Cu_2O/ZnO berperan penting dalam meningkatkan transport elektron dan menekan rekombinasi pembawa muatan, sehingga mampu menghasilkan nilai arus hubung singkat yang lebih tinggi. Berdasarkan hasil penelitian ini, nilai Isc tertinggi sebesar 145,8 mA diperoleh pada sampel K3 dengan temperatur pemanasan substrat 500°C. Hasil tersebut mengindikasikan bahwa kondisi tersebut merupakan kombinasi yang paling efektif dalam mendukung proses transport elektron pada struktur *heterojunction* Cu_2O/ZnO/FTO.

Meskipun demikian, nilai Isc belum sepenuhnya mencerminkan kemampuan perangkat dalam menghasilkan energi listrik. Oleh karena itu, diperlukan analisis terhadap daya keluaran (*output power*, P) yang merupakan hasil kombinasi antara tegangan rangkaian terbuka (Voc) dan arus hubung singkat (Isc). Hubungan antara temperatur pemanasan substrat dengan daya keluaran perangkat disajikan pada Gambar 4.



Gambar 4. Pengaruh Temperatur Pemanasan Substrat dan Konsentrasi larutan terhadap Daya Keluaran (Output Power)

Berdasarkan Gambar 4, daya keluaran (*output power*) *solar cell heterojunction* Cu_2O/ZnO/FTO menunjukkan kecenderungan yang berbeda pada setiap variasi konsentrasi larutan prekursor ZnO:Mg. Pada konsentrasi K1 (0,3 M : 0,03 M), daya keluaran mengalami peningkatan dari 0,551 mW pada temperatur pemanasan substrat 425°C menjadi 2,128 mW pada 450°C. Selanjutnya, daya menurun menjadi 1,198 mW pada temperatur 475°C, kemudian kembali meningkat menjadi 2,022 mW pada temperatur 500°C. Sementara itu, pada konsentrasi K2 (0,4 M : 0,04 M), daya meningkat secara signifikan dari 0,321 mW pada 425°C hingga mencapai nilai maksimum sebesar 5,946 mW pada temperatur 475°C, kemudian menurun tajam menjadi 1,010 mW pada temperatur 500°C. Berbeda dengan kedua variasi tersebut, konsentrasi K3 (0,5 M : 0,05 M) menunjukkan peningkatan daya secara konsisten seiring bertambahnya temperatur pemanasan substrat, yaitu dari 1,595 mW pada 425°C menjadi 17,57 mW pada temperatur 500°C.

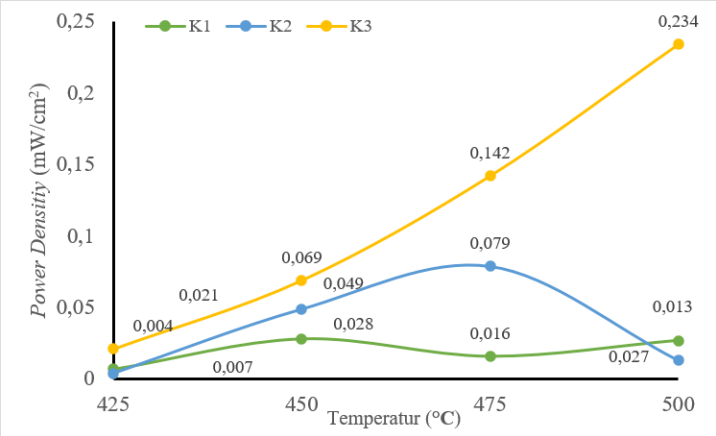
Peningkatan daya keluaran pada temperatur pemanasan yang lebih tinggi menunjukkan bahwa proses *spray pyrolysis* berlangsung lebih sempurna sehingga menghasilkan lapisan ZnO:Mg dengan kristalinitas yang lebih baik, morfologi permukaan yang lebih seragam, serta kontak antarmuka yang semakin baik dengan lapisan Cu_2O. Kondisi tersebut meningkatkan mobilitas pembawa muatan dan menurunkan hambatan internal perangkat sehingga nilai tegangan (Voc) dan arus (Isc) yang dihasilkan meningkat. Karena daya keluaran merupakan hasil perkalian antara tegangan dan arus, peningkatan kedua parameter tersebut secara langsung menyebabkan kenaikan daya keluaran solar cell.

Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian (Najah et al., 2025) yang melaporkan bahwa peningkatan temperatur *spray pyrolysis* hingga kondisi optimum mampu memperbaiki kualitas lapisan semikonduktor sehingga menghasilkan performa fotovoltaik yang lebih baik. Temperatur yang sesuai mendorong terbentuknya lapisan dengan struktur kristal yang lebih teratur, sehingga proses pemisahan dan *transport elektron-hole* berlangsung lebih efisien. Namun, temperatur yang terlalu tinggi dapat menyebabkan peningkatan tegangan termal selama deposisi sehingga memicu terbentuknya cacat permukaan atau perubahan morfologi lapisan yang menghambat transport muatan. Kondisi tersebut terlihat pada variasi K2, dimana daya keluaran mengalami penurunan ketika temperatur dinaikkan dari 475°C menjadi 500°C.

Sebaliknya, pada konsentrasi K3 peningkatan temperatur hingga 500°C masih mampu meningkatkan daya keluaran secara signifikan. Hal ini mengindikasikan bahwa konsentrasi prekursor ZnO:Mg sebesar 0,5 M : 0,05 M memberikan jumlah material yang cukup untuk membentuk lapisan yang lebih homogen pada temperatur tinggi, sehingga kualitas sambungan *heterojunction* Cu_2O/ZnO menjadi lebih baik. Antarmuka yang semakin baik mampu menekan rekombinasi pasangan elektron-hole dan meningkatkan efisiensi transport muatan menuju elektroda, sehingga daya keluaran yang dihasilkan menjadi paling tinggi dibandingkan variasi lainnya. Fenomena ini sesuai dengan penelitian (Özdal & Kavak, 2020) yang menyatakan bahwa kualitas antarmuka ZnO/Cu_2O merupakan faktor penting yang menentukan performa fotovoltaik, karena antarmuka yang homogen mampu meningkatkan pemisahan muatan dan mengurangi kehilangan energi akibat rekombinasi.

Selain temperatur, konsentrasi larutan prekursor juga memberikan pengaruh yang cukup besar terhadap daya keluaran solar cell. Konsentrasi prekursor yang lebih tinggi menyediakan jumlah ion yang lebih banyak selama proses pembentukan lapisan ZnO:Mg sehingga menghasilkan lapisan yang lebih rapat dan kontinu. Kondisi ini mendukung terbentuknya jalur transport elektron yang lebih efektif menuju elektroda transparan FTO. Hasil tersebut sesuai dengan penjelasan (Abdurrahman et al., 2022) bahwa konsentrasi prekursor yang optimum mampu menghasilkan morfologi lapisan yang homogen dan meningkatkan efektivitas transport muatan. Oleh karena itu, kombinasi temperatur pemanasan substrat 500°C dan konsentrasi larutan K3 (0,5 M : 0,05 M) menghasilkan daya keluaran tertinggi sebesar 17,57 mW, sehingga dapat dianggap sebagai kondisi optimum pada penelitian ini.

Untuk memperoleh gambaran yang lebih jelas mengenai pengaruh variasi temperatur pemanasan substrat terhadap daya per satuan luas (*power density*) *solar cell heterojunction* Cu_2O/ZnO/FTO, hasil perhitungan nilai Parea pada masing-masing variasi konsentrasi larutan prekursor ZnO:Mg disajikan dalam bentuk grafik. Hubungan antara temperatur pemanasan substrat dengan daya per satuan luas perangkat ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Pengaruh Temperatur Pemanasan Substrat dan Konsentrasi larutan terhadap Daya per Satuan Luas (Power Density, Parea)

Berdasarkan Gambar 5, daya per satuan luas (*power density*) *solar cell heterojunction* Cu_2O/ZnO/FTO menunjukkan kecenderungan yang berbeda pada setiap variasi konsentrasi larutan prekursor ZnO:Mg. Pada konsentrasi K1, nilai *power density* mengalami peningkatan dari temperatur pemanasan substrat 425°C hingga 450°C, kemudian menurun pada temperatur 475°C dan kembali meningkat pada temperatur 500°C. Sementara itu, pada konsentrasi K2 terjadi peningkatan *power density* yang cukup signifikan hingga mencapai nilai maksimum pada temperatur 475°C, kemudian mengalami penurunan pada temperatur 500°C. Berbeda dengan kedua variasi tersebut, konsentrasi K3 menunjukkan peningkatan *power density* secara konsisten seiring meningkatnya temperatur pemanasan substrat, dengan nilai tertinggi diperoleh pada temperatur 500°C.

Peningkatan nilai *power density* mengindikasikan bahwa energi listrik yang dihasilkan per satuan luas aktif perangkat semakin besar. Kondisi ini menunjukkan bahwa proses pemanasan substrat pada temperatur yang lebih tinggi mampu meningkatkan kualitas lapisan tipis ZnO:Mg yang terbentuk melalui metode *spray pyrolysis*. Temperatur yang memadai mempercepat dekomposisi prekursor sehingga menghasilkan lapisan

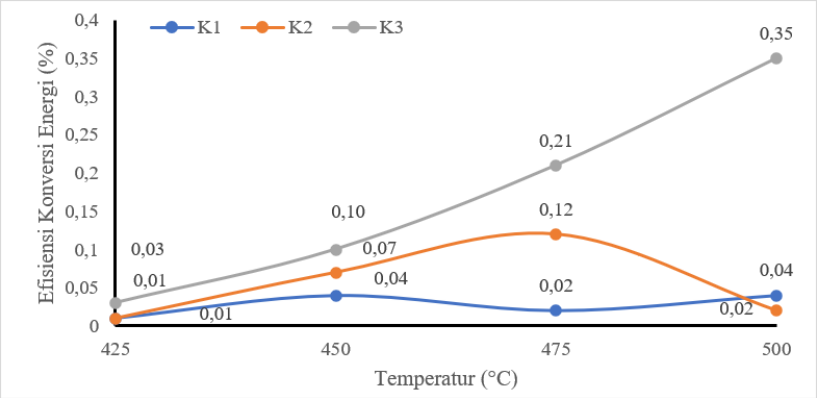
yang lebih homogen, memiliki kristalinitas yang lebih baik, serta membentuk kontak antarmuka yang lebih baik dengan lapisan Cu_2O. Perbaikan kualitas antarmuka tersebut meningkatkan efisiensi pemisahan dan transport pembawa muatan, sehingga daya listrik yang dihasilkan per satuan luas menjadi lebih tinggi.

Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian (Najah et al., 2025) yang melaporkan bahwa parameter deposisi, khususnya temperatur selama proses *spray pyrolysis*, berpengaruh terhadap karakteristik optoelektronik lapisan FTO/ZnO/Cu_2O. Temperatur deposisi yang optimum menghasilkan lapisan dengan morfologi yang lebih rapat dan seragam sehingga mampu meningkatkan respons listrik perangkat. Sebaliknya, temperatur yang terlalu tinggi dapat memicu terbentuknya cacat kristal maupun tegangan termal yang meningkatkan peluang rekombinasi elektron-hole sehingga performa perangkat menurun. Fenomena tersebut terlihat pada variasi K2 yang mengalami penurunan nilai *power density* ketika temperatur dinaikkan dari 475°C menjadi 500°C.

Pada konsentrasi K3, peningkatan temperatur hingga 500°C justru menghasilkan nilai *power density* tertinggi dibandingkan seluruh variasi. Hal ini menunjukkan bahwa kombinasi konsentrasi prekursor ZnO:Mg yang lebih tinggi dengan temperatur pemanasan substrat 500°C mampu menghasilkan lapisan semikonduktor yang lebih kontinu dan berkualitas sehingga transport elektron menuju elektroda berlangsung lebih efektif. Hasil tersebut sejalan dengan penelitian (Tran et al., 2018) yang menunjukkan bahwa kualitas lapisan ZnMgO hasil *spray pyrolysis* sangat menentukan kinerja *heterojunction* Cu_2O/ZnMgO. Lapisan dengan struktur yang baik mampu memperbaiki penyelarasan pita energi (band alignment), menekan rekombinasi pembawa muatan, dan meningkatkan keluaran daya perangkat fotovoltaik.

Pengaruh Variasi Temperatur dan Konsentrasi larutan terhadap Efisiensi Konversi Energi

Efisiensi konversi energi merupakan salah satu parameter utama dalam mengevaluasi kinerja *solar cell* karena menunjukkan kemampuan perangkat dalam mengubah energi cahaya matahari menjadi energi listrik. Nilai efisiensi dipengaruhi oleh berbagai faktor, di antaranya kualitas lapisan semikonduktor, karakteristik antarmuka *heterojunction*, serta parameter fabrikasi yang digunakan, termasuk temperatur pemanasan substrat dan konsentrasi larutan prekursor ZnO:Mg. Berdasarkan hasil perhitungan efisiensi pada setiap variasi temperatur pemanasan substrat dan konsentrasi larutan prekursor ZnO:Mg, hubungan kedua parameter tersebut terhadap efisiensi konversi energi disajikan dalam bentuk grafik pada Gambar 6.



Gambar 6. Grafik Pengaruh Variasi Temperatur dan Konsentrasi larutan terhadap Efisiensi Konversi Energi Solar Cell Heterojunction Cu_2O/ZnO/FTO

Berdasarkan Gambar 6, efisiensi konversi energi *solar cell heterojunction* Cu_2O/ZnO/FTO menunjukkan kecenderungan yang berbeda pada setiap variasi konsentrasi larutan prekursor ZnO:Mg. Pada konsentrasi K1 (0,3 M : 0,03 M), efisiensi mengalami peningkatan dari 0,10% pada temperatur pemanasan substrat 425°C menjadi 0,04% pada 450°C, kemudian menurun menjadi 0,02% pada 475°C dan kembali meningkat menjadi 0,04% pada 500°C. Pada konsentrasi K2 (0,4 M : 0,04 M), efisiensi meningkat secara signifikan dari 0,01% pada 425°C hingga mencapai 0,12% pada temperatur 475°C, kemudian menurun menjadi 0,02% pada temperatur 500°C. Berbeda dengan kedua variasi tersebut, konsentrasi K3 (0,5 M : 0,05 M) menunjukkan peningkatan efisiensi secara konsisten seiring bertambahnya temperatur pemanasan substrat, yaitu dari 0,03% pada 425°C menjadi 0,35% pada temperatur 500°C. Hasil ini menunjukkan bahwa

kombinasi temperatur pemanasan substrat dan konsentrasi larutan prekursor memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kemampuan perangkat dalam mengonversi energi cahaya menjadi energi listrik.

Peningkatan efisiensi konversi energi pada temperatur pemanasan yang lebih tinggi menunjukkan bahwa proses pembentukan lapisan ZnO:Mg melalui metode *spray pyrolysis* berlangsung lebih optimal. Temperatur yang memadai mempercepat dekomposisi prekursor dan pembentukan kristal ZnO:Mg sehingga menghasilkan lapisan dengan kristalinitas yang lebih baik, permukaan yang lebih homogen, serta kontak antarmuka yang lebih baik dengan lapisan Cu_2O. Perbaikan kualitas antarmuka tersebut mampu meningkatkan pemisahan pasangan elektron-hole sekaligus memperlancar transport pembawa muatan menuju elektroda, sehingga nilai tegangan, arus, dan daya keluaran meningkat. Karena efisiensi merupakan perbandingan antara daya keluaran terhadap daya cahaya yang diterima, peningkatan daya keluaran secara langsung akan meningkatkan nilai efisiensi konversi energi.

Hasil penelitian ini sejalan dengan (Tran et al., 2018) yang melaporkan bahwa kualitas lapisan Cu_2O dan antarmuka *heterojunction* sangat memengaruhi performa fotovoltaik. Lapisan dengan struktur kristal yang baik mampu meningkatkan pemisahan pembawa muatan dan mengurangi kehilangan energi akibat rekombinasi, sehingga efisiensi perangkat meningkat. Selain itu, (Wang et al., 2023) juga menjelaskan bahwa kualitas antarmuka ZnO/Cu_2O berperan penting dalam meningkatkan mobilitas pembawa muatan serta memperbaiki proses ekstraksi elektron, menghasilkan efisiensi konversi energi yang lebih tinggi. Kondisi tersebut sesuai hasil penelitian ini, peningkatan temperatur pemanasan hingga 500°C pada variasi K3 menghasilkan efisiensi tertinggi sebesar 0,35%.

Penurunan efisiensi yang terjadi pada variasi K2 ketika temperatur dinaikkan dari 475°C menjadi 500°C menunjukkan bahwa temperatur yang terlalu tinggi tidak selalu memberikan peningkatan performa. Temperatur berlebih dapat memicu terbentuknya cacat kristal, tegangan termal, atau perubahan morfologi lapisan yang meningkatkan peluang rekombinasi elektron-hole sebelum mencapai elektroda. Fenomena tersebut juga dijelaskan oleh (Özdal & Kavak, 2020) yang menyatakan bahwa kualitas antarmuka ZnO/Cu_2O sangat menentukan kinerja perangkat fotovoltaik, sehingga keberadaan cacat pada antarmuka dapat meningkatkan hambatan transport muatan dan menurunkan efisiensi konversi energi. Hasil serupa juga dilaporkan oleh (Najah et al., 2025), yang menunjukkan bahwa terdapat kondisi temperatur deposisi optimum untuk menghasilkan lapisan ZnO dengan karakteristik optoelektronik terbaik.

SIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa variasi temperatur pemanasan substrat dan konsentrasi larutan prekursor ZnO berpengaruh signifikan terhadap performa solar cell heterojunction Cu_2O/ZnO/FTO yang difabrikasi menggunakan metode *spray pyrolysis*. Peningkatan temperatur pemanasan dan konsentrasi prekursor mampu meningkatkan tegangan rangkaian terbuka (VOC), arus hubung singkat (ISC), daya keluaran, daya per satuan luas, serta efisiensi konversi energi. Performa terbaik diperoleh pada variasi konsentrasi K3 (0,5 M : 0,05 M) dengan temperatur pemanasan 500°C yang menghasilkan VOC sebesar 120 mV, ISC sebesar 14,8 mA, daya keluaran sebesar 17,57 mW, daya per satuan luas sebesar 0,234 mW/cm², dan efisiensi konversi energi tertinggi sebesar 0,35%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kombinasi parameter tersebut merupakan kondisi fabrikasi yang paling optimal dalam penelitian ini.

Penelitian selanjutnya disarankan menggunakan kombinasi parameter fabrikasi optimum yang diperoleh sebagai acuan dalam pengembangan solar cell heterojunction Cu_2O/ZnO/FTO pada skala yang lebih mendekati aplikasi nyata. Selain itu, karakterisasi material menggunakan X-Ray Diffraction (XRD), Scanning Electron Microscopy (SEM), UV–Vis Spectroscopy, dan Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) perlu dilakukan untuk menganalisis struktur kristal, morfologi permukaan, komposisi unsur, dan sifat optik lapisan ZnO. Karakterisasi tersebut diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai hubungan antara karakteristik material dan performa listrik, sehingga dapat mendukung peningkatan efisiensi perangkat pada penelitian selanjutnya.

DAFTAR PUSTAKA

Abdurrahman, M., Burari, F. W., & Olasoji, O. W. (2022). *Analysis of the ZnO / Cu 2 O and CdSe / Cu 2 O Thin Film Hetero-structure Electrode for Photo Electrochemical Solar Cell Applications*. *8*(4), 123–132. https://doi.org/10.31695/IJASRE.2022.8.4.10

Al-Ezzi, A. S., & Ansari, M. N. M. (2022). Photovoltaic Solar Cells: A Review. *Applied System Innovation*, *5*(4), 1–17. https://doi.org/10.3390/asi5040067

Alnavis, N. B., Wirawan, R. R., Solihah, K. I., & Nugroho, V. H. (2024). *Energi listrik berkelanjutan : Potensi dan tantangan penyediaan energi listrik di Indonesia*. *1*(2), 119–139.

Cuadra, J. G., Estrada, A. C., Oliveira, C., Abderrahim, L. A., Porcar, S., Fraga, D., Trindade, T., Seabra, M. P., Labrincha, J., & Carda, J. B. (2023). Functional properties of transparent ZnO thin films synthetized by using spray pyrolysis for environmental and biomedical applications. *Ceramics International*, *49*(20), 32779–32788. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.07.246

Efe-onakpojeruo, C. C., Seraj, M., & Ozdeser, H. (2024). *Advances in Environmental and Engineering Research Comparative Analysis of the Relationship between Renewable Energy Adoption , Fossil Fuel Energy Consumption , and CO 2 Emission in the United States and China*. https://doi.org/10.21926/aeer.2403018

Li, J., Mendoza, H. E. T., Kundmann, A., & Osterloh, F. E. (2024). *Effect of ZnO and PEDOT : PSS Charge Selective Layers on Photovoltage of Cuprous Oxide (Cu 2 O) Heterojunction Solar Cells*. 3–6.

Michael, P. R., Johnston, D. E., & Moreno, W. (2020). *A conversion guide : solar irradiance and lux illuminance*. 153–166. https://doi.org/10.21595/jme.2020.21667

Najah, M. N., Rahmania, F. A., Cahyanti, I., Hesnaty, M., Hajar, S., Hartanto, D., Prasetyo, W., Sari, R., & Nur, H. (2025). South African Journal of Chemical Engineering Parameter influences of FTO / ZnO / Cu ₂ O photodetectors fabricated by electrodeposition and spray pyrolysis techniques. *South African Journal of Chemical Engineering*, *51*(September 2024), 188–201. https://doi.org/10.1016/j.sajce.2024.11.009

Özdal, T., & Kavak, H. (2020). Fabrication and characterization of ZnO/Cu2O heterostructures for solar cells applications. *Superlattices and Microstructures*, *146*(August). https://doi.org/10.1016/j.spmi.2020.106679

Ramírez-amador, R., Alvarado-pulido, J. J., & Martínez-hernández, H. P. (n.d.). *Study of fluorine-doped tin oxide thin films deposited by pneumatic spray pyrolysis and ultrasonic spray pyrolysis : a direct comparison Study of fl uorine-doped tin oxide thin fi lms deposited by pneumatic spray pyrolysis and ultrasonic spray pyrolysis : a direct comparison*.

Saehana, S., Siswomiharjo, D., & Aprilia, A. (2025). Investigation of Experimental Parameters in Fabrication of Fluorine-Doped Tin Oxide (FTO) Using Spray Pyrolysis. *International Journal of Heat and Technology*, *43*(3), 1076–1084. https://doi.org/10.18280/ijht.430326

Salim, K., Azzaoui, W., & Development, M. (2023). *Physical properties of spray pyrolysed ZnO thin films obtained from nitrate , acetate and chloride precursors : Comparative study for Solar Cell Applications*. *3*, 1–8.

Silalahi, D. F., Blakers, A., Stocks, M., Lu, B., Cheng, C., & Hayes, L. (2021). *Indonesia ' s Vast Solar Energy Potential*.

Silalahi, D. F., & Gunawan, D. (n.d.). *Solar Energy Potentials and Opportunity of Floating Solar PV in Indonesia*. *2022*, 63–88. https://doi.org/10.55981/brin.562.c5

Tran, M. H., Cho, J. Y., Sinha, S., Gang, M. G., & Heo, J. (2018). Cu2O/ZnO heterojunction thin-film solar cells: the effect of electrodeposition condition and thickness of Cu2O. *Thin Solid Films*, *661*, 132–136. https://doi.org/10.1016/j.tsf.2018.07.023

Wang, B., Chen, Z., & Zhao, F. (2023). Cu2O Heterojunction Solar Cell with Photovoltaic Properties Enhanced by a Ti Buffer Layer. *Sustainability (Switzerland)*, *15*(14). https://doi.org/10.3390/su151410876