

PENGARUH SUHU KALSINASI TERHADAP BANDGAP SEMIKONDUKTOR TiO₂ SEBAGAI FOTOANODA PADA KACA SUBSTRAT CuSnO₃ UNTUK APLIKASI DSSC

A. Fitriani, H. Sanjaya*, B. Oktavia, dan A.J. Kusnanda

Program Studi Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Padang, Padang, Indonesia

**e-mail: hary.s@fmipa.unp.ac.id*

Article Received on: 18th May 2026

Revised on: 9th July 2026

Accepted on: 30th July 2026

ABSTRAK

Kebutuhan terhadap sumber energi terbarukan mendorong pengembangan teknologi Dye-Sensitized Solar Cells (DSSC) sebagai alternatif sel surya yang ramah lingkungan dan berbiaya rendah. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi suhu kalsinasi terhadap nilai bandgap TiO₂ sebagai fotoanoda pada substrat CuSnO₃ serta mengevaluasi karakteristik substrat CuSnO₃ sebagai material alternatif pengganti kaca konduktif FTO dan ITO pada DSSC. Substrat CuSnO₃ disintesis menggunakan metode sol-gel dengan prekursor SnCl₂·2H₂O dan Cu(NO₃)₂·3H₂O dalam pelarut metanol serta penambahan *diethanolamine* (DEA) sebagai penstabil. Lapisan CuSnO₃ dideposisikan pada kaca preparat menggunakan metode *spin coating* dan dikalsinasi pada suhu 550 °C selama 2 jam. Pasta TiO₂ dibuat menggunakan metode pencampuran TiO₂ dan etanol, kemudian dilapiskan pada substrat CuSnO₃ menggunakan metode *doctor blade*. Variasi suhu kalsinasi TiO₂ dilakukan pada 400, 450, 500, dan 550 °C selama 30 menit. Karakterisasi dilakukan menggunakan UV-DRS untuk menentukan nilai bandgap melalui metode *Tauc plot*, SEM-EDS untuk analisis morfologi dan komposisi unsur, serta *Four Point Probe* (FPP) untuk pengujian resistivitas. Hasil penelitian menunjukkan bahwa lapisan tipis CuSnO₃ memiliki nilai bandgap sebesar 2,12 eV dan hambatan 458,89 Ω. Morfologi permukaan CuSnO₃ menunjukkan partikel yang tidak homogen dan saling menempel. Nilai bandgap TiO₂ berturut-turut sebesar 3,16; 3,03; 3,103; dan 3,095 eV untuk suhu kalsinasi 400, 450, 500, dan 550 °C. Nilai bandgap minimum yang terukur pada suhu 450 °C sebesar 3,03 eV yang menunjukkan peningkatan kemampuan penyerapan cahaya dan potensi peningkatan efisiensi DSSC.

Kata kunci: Bandgap, CuSnO₃, Kalsinasi, Titanium dioksida

ABSTRACT

The increasing demand for renewable energy has encouraged the development of Dye-Sensitized Solar Cells (DSSC) as an environmentally friendly and low-cost alternative solar cell technology. This study aimed to investigate the effect of calcination temperature variations on the bandgap value of TiO₂ as a photoanode on CuSnO₃ substrates and to evaluate the characteristics of CuSnO₃ as an alternative conductive substrate material to replace FTO and ITO glass in DSSC applications. CuSnO₃ substrates were synthesized using the sol-gel method with SnCl₂·2H₂O and Cu(NO₃)₂·3H₂O precursors dissolved in methanol and stabilized using diethanolamine (DEA). The CuSnO₃ thin films were deposited on glass substrates using the spin coating method and calcined at 550 °C for 2 hours. TiO₂ paste was prepared by mixing TiO₂ powder with ethanol and coated onto the CuSnO₃ substrate using the doctor blade technique. TiO₂ calcination temperatures were varied at 400, 450, 500, and 550 °C for 30 minutes. Characterization was carried out using UV-DRS to determine the bandgap through the Tauc Plot method, SEM-EDS to analyze surface morphology and elemental composition, and Four Point Probe (FPP) to evaluate electrical conductivity. The results showed that the CuSnO₃ thin film had a bandgap value of 2.12 eV and an obstacle 458,89 Ω. The surface morphology indicated irregular and agglomerated particles. The TiO₂ bandgap values were 3.16, 3.03, 3.103, and 3.095 eV at calcination temperatures of 400, 450, 500, and 550 °C, respectively. The minimum bandgap value was measured at a temperature of 450 °C with a value of 3.03 eV, indicating enhanced visible light absorption and the potential to improve DSSC efficiency.

Kata kunci: Bandgap, CuSnO₃, Calcination, Titanium dioxide

PENDAHULUAN

Kebutuhan akan sumber energi terbarukan dan berkelanjutan semakin meningkat saat ini (Kidowaki *et al.*, 2012). Konsumsi energi yang meningkat diakibatkan pesatnya populasi ini menyebabkan berkurangnya bahan bakar fosil secara signifikan (Adeloye *et al.*, 2025). Produksi listrik tradisional yang berbasis pada bahan bakar fosil berkontribusi dalam menyebabkan hujan asam, pencemaran lingkungan, dan pemanasan global (Wisiz *et al.*, 2021). Alternatif yang dapat digunakan salah satunya adalah penggunaan sel surya yang digunakan sebagai perangkat fotovoltaik dengan efisiensi tinggi untuk energi terbarukan berkelanjutan (Adeloye *et al.*, 2025). Sel surya menawarkan manfaat seperti kemampuannya menyerap energi radiasi matahari, dampak lingkungan yang rendah, serta aplikasi dan penggunaan jangka panjang yang baik (Wisiz *et al.*, 2021).

Sel surya adalah sistem yang mengubah cahaya matahari menjadi listrik. Seiring waktu, teknologi ini telah berkembang menjadi tiga generasi yaitu sel surya generasi pertama berbasis silikon yang memiliki efisiensi tinggi, sel surya generasi kedua yang menawarkan fleksibilitas dan biaya produksi yang lebih rendah dibanding sel surya generasi pertama, sel surya generasi ketiga seperti *Dye Sensitized Solar Cells*, *quantum dot solar cells* dan *organic solar cells* yang memiliki biaya fabrikasi yang lebih rendah (Khairudin *et al.*, 2026).

Dye-Sensitized Solar Cells (DSSC) adalah alternatif sel surya yang hemat biaya, efisien, dan ramah lingkungan dibandingkan dengan sel surya konvensional. Menurut Kumar, DSSC menawarkan kelebihan berbiaya rendah dibanding sel surya Si (generasi pertama), ringan dibanding sel surya *film* tipis (generasi kedua), serta proses pembuatan yang murah (Kumar *et al.*, 2024). Wisiz menyatakan bahwa DSSC dapat digunakan untuk menciptakan struktur fotovoltaik (PV) yang kompetitif, efisien, dan terjangkau yang dapat menggantikan sel surya tradisional (Wisiz *et al.*, 2021).

Prinsip kerja dasar DSSC melibatkan eksitasi zat warna ketika terpapar cahaya. Elektron dalam keadaan tereksitasi bertransisi ke pita konduksi material semikonduktor menghasilkan aliran elektron. Elektron-elektron ini kemudian bermigrasi melalui lapisan semikonduktor yang tipis dan berpori ke lapisan konduktif transparan. Aliran elektron bergantung pada cahaya yang masuk serta mekanisme penangkapan dan pelepasan elektron (Sugathan *et al.*, 2015).

Ketika molekul zat warna melepaskan elektron, molekul tersebut teroksidasi dan dapat kembali ke

keadaan awalnya dengan menerima elektron dari mediator redoks, seperti I^-/I_3^- . Mediator ini kemudian juga teroksidasi. Ion I_3^- yang dihasilkan kemudian bergerak ke elektroda lawan, di mana ion tersebut direduksi kembali oleh elektron dari rangkaian eksternal, memungkinkan sistem untuk beroperasi dalam siklus berkelanjutan (Sugathan *et al.*, 2015). Elektrolit yang mengandung pasangan redoks I^-/I_3^- membantu menjaga keseimbangan muatan dengan mengubah I_3^- kembali menjadi I^- di fotoanoda dan mengembalikan I_3^- di elektroda lawan (Srivastava *et al.*, 2025).

DSSC biasanya terdiri dari lapisan kaca konduktif (seperti FTO dan ITO), lapisan *dye-sensitized*, fotoelektroda, dan elektroda lawan (Sun *et al.*, 2024). Kaca TCO (*Transparent Conducting Oxide*) terdiri dari FTO (*Fluorine doped Tin Oxide*) dan ITO (*Indium tin oxide*). Kaca FTO dan ITO digunakan sebagai substrat konduktif (Francis & Ikenna, 2021). Substrat kaca ITO memiliki kelemahan berupa harga yang tinggi, sementara kaca FTO memiliki kelemahan yaitu harganya mahal dan sulit didapatkan, serta sifatnya yang rapuh. Kelemahan dari kaca FTO tersebut menjadikan ia tidak cocok sebagai substrat fleksibel, transparansi yang kurang optimal terhadap spektrum cahaya inframerah dekat, serta adanya kebocoran arus yang disebabkan cacat struktur (Filiandini & Sanjaya, 2025). Keterbatasan yang terdapat pada kaca substrat ITO dan FTO mendorong pengembangan material alternatif untuk aplikasi DSSC. Salah satu materialnya adalah *Copper tin oxide* ($CuSnO_3$) dapat dijadikan substrat alternatif DSSC.

Tembaga timah oksida ($CuSnO_3$) adalah jenis semikonduktor oksida amorf yang memiliki celah pita yang dapat disesuaikan mulai dari 2,0 hingga 2,5 eV. ($CuSnO_3$). Material ini tersusun dari unsur-unsur yang melimpah di alam dan murah untuk diproduksi. $CuSnO_3$ ini dianggap sebagai semikonduktor yang menjanjikan untuk berbagai penggunaan, seperti konduktor oksida transparan, transistor, dan baterai ion litium (Kim *et al.*, 2018). *Copper tin oxide* memiliki sifat khusus diantaranya sintesis yang mudah, harga terjangkau, konduktivitas listrik yang sangat baik, efek sinergis yang baik, struktur dua lapis, distorsi kristal yang unik, struktur pita energi dengan sifat superkonduktivitas, kapasitansi spesifik yang tinggi, dan stabil (Gnanamoorthy *et al.*, 2020).

Efektivitas DSSC sangat dipengaruhi oleh pilihan pewarna dan semikonduktor yang digunakan. Beberapa penelitian berfokus pada penggunaan oksida semikonduktor nanopartikel, hal ini disebabkan oleh luas permukaan nanopartikel oksida semikonduktor yang cukup efektif, yang

memungkinkan penyerapan molekul pewarna, membantu penyerapan cahaya dan transformasinya menjadi energi listrik (Devi Maryani *et al.*, 2012). Oksida semikonduktor yang umum digunakan dalam DSSC yaitu SnO₂, Nb₂O₅, TiO₂, ZnO, dan ZrO₂ (Francis & Ikenna, 2021), MgO dan Al₂O₃ (Roslan *et al.*, 2018). Diantara beberapa oksida logam tersebut yang paling banyak digunakan adalah TiO₂.

Titanium Dioksida (TiO₂) memiliki empat polimorf, yaitu anatase, rutil, brookite, dan TiO₂ (B). Anatase dan rutil memiliki struktur tetragonal, sedangkan brookite berstruktur ortorombik yang khas (Eddy *et al.*, 2023). Dalam DSSC, TiO₂ berfungsi sebagai akseptor elektron (Ika Nirmalasari, Ratri Ariatmi Nugrahani, 2022). Karakteristik TiO₂ seperti struktur kristal, ukuran kristalit, morfologi permukaan, sifat optik menentukan kualitas material untuk aplikasi fotovoltaik (Kanmaz, 2024). Sifat TiO₂ dapat dimodifikasi melalui beberapa cara yaitu penyempitan bandgap, pembentukan kekosongan untuk rekristalisasi atau penambahan tingkat energi pengotor (Xu *et al.*, 2024).

Kim *et al.* (2018) menyatakan bahwa CuSnO₃ memiliki sifat optik dan listrik yang baik sebagai semikonduktor oksida transparan serta menunjukkan potensi untuk aplikasi fotoelektrokimia. Namun, penelitian tersebut belum mengkaji tentang CuSnO₃ sebagai substrat pada DSSC. Penelitian oleh Filiandini & Sanjaya (2025) dan Rizka & Sanjaya (2023) berfokus pada sintesis dan karakterisasi lapisan tipis CuSnO₃. Namun, penelitian tersebut belum mengkaji pengaruh pelapisan TiO₂ maupun variasi suhu kalsinasi TiO₂ yang dilapiskan pada CuSnO₃ sebagai substrat. Sementara itu, Kanmaz (2024) menyatakan bahwa variasi suhu kalsinasi dapat memengaruhi kristalinitas, sifat optik, dan sifat listrik lapisan TiO₂, tetapi menggunakan substrat konvensional. Oleh karena itu, diperlukan kajian mengenai pengaruh variasi suhu kalsinasi TiO₂ yang dilapiskan pada substrat CuSnO₃. Kebaruan penelitian ini terletak pada substrat CuSnO₃ serta karakterisasi nilai bandgap TiO₂ dengan CuSnO₃ sebagai substrat. Penelitian ini didasarkan pada dugaan bahwa variasi suhu kalsinasi memengaruhi nilai bandgap lapisan TiO₂ yang dilapiskan pada substrat CuSnO₃ sehingga berpengaruh terhadap karakteristik material untuk aplikasi DSSC. Berdasarkan hal tersebut, tujuan kajian ini untuk mengetahui pengaruh variasi suhu kalsinasi terhadap nilai bandgap TiO₂ serta mengkarakterisasi substrat CuSnO₃ pada nilai bandgap, morfologi permukaan dan hambatan listrik yang menunjukkan

potensi material sebagai alternatif substrat konduktif pada aplikasi DSSC.

MATERI DAN METODE

Bahan

Bahan-bahan yang digunakan yaitu *Titanium dioxide* (TiO₂, MERCK), SnCl₂·2H₂O (MERCK) dan Cu(NO₃)₂·3H₂O (MERCK), DEA (*Diethanolamine*), etanol p.a (MERCK), metanol, kaca preparat.

Peralatan

Alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah gelas ukur, gelas *beaker*, labu ukur, batang pengaduk, spatula, *cotton bud*, neraca analitik, pipet takar, penangas air, *penjepit*, *oven*, *furnace hot plate*, *ultrasonik cleanser*, *magnetic stirrer*, *spin coating*, *spin bar*. Instrumen yang digunakan dalam penelitian ini adalah UV-DRS (*Ultraviolet-Visible Diffuse Reflectance Spectroscopy*), dan FPP (*Four Point Probe*), SEM-EDS (*Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive Spectroscopy*).

Analisis Data

Hambatan CuSnO₃

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

Dimana: V = Tegangan (V, Volt)

I = Kuat Arus (A, Ampere)

R = Hambatan (Ω, Ohm)

Cara Kerja

Preparasi Kaca Substrat CuSnO₃

SnCl₂·2H₂O dan Cu(NO₃)₂·3H₂O dilarutkan dengan perbandingan mol 1:1 ke dalam 50 ml metanol hingga tercampur sempurna. Tambahkan DEA 2 ml pada campuran dan sonikasi selama 1 jam. Kemudian, di *stirring* pada suhu 50°C selama 6 jam hingga tercampur merata. Setelah itu, didiamkan selama 12 jam. Kaca preparat yang digunakan dibersihkan dengan metanol dan telah dipotong (Rizka & Sanjaya, 2023). Larutan CuSnO₃ yang telah disiapkan kemudian diaplikasikan ke permukaan kaca dengan metode *spin-coating* pada kecepatan 2000 rpm selama 60 detik. Setelah itu, lapisan dikeringkan di oven pada suhu 110 °C selama 15 menit dan selanjutnya dikalsinasi pada suhu 550 °C selama 2 jam (Kim *et al.*, 2018).

Preparasi Pasta TiO₂

Serbuk TiO₂ 0,5 gram dicampur dalam 4 ml larutan etanol. Campuran tersebut diaduk pada gelas kimia dengan menggunakan *magnetic stirrer* 300 rpm selama 60 menit, setelah itu disonikasi selama

60 menit hingga terbentuk pasta (Umayya & Hardeli, 2023)

Pelapisan TiO_2 pada Kaca CuSnO_3

Kaca CuSnO_3 yang telah dibersihkan dibentuk *scotch tape* ukuran 1x1 cm. Setelah itu dideposisikan sol (pasta) untuk film tipis kata CuSnO_3 menggunakan metode *doctor blade* yang berguna untuk meratakannya. Pendeposisian sol TiO_2 lapisan yang terbentuk dipanaskan pada *hot plate* suhu 100°C selama 30 menit (Dihan Kurnia Saputra, Sherly Kasuma Warda Ningsih, 2015). Setelah itu kaca di kalsinasi pada (400, 450, 500, 550) $^\circ\text{C}$ selama 30 menit (Maulina, 2014).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Sintesis CuSnO_3

Sintesis CuSnO_3 dilakukan dengan menggunakan metode sol-gel, prekursor yang digunakan adalah $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ dan $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ dilarutkan dengan perbandingan mol 1:1. Setelah proses sonikasi, terbentuk larutan prekursor yang homogen berwarna biru elektrik yang merata tanpa adanya endapan yang terlihat secara visual. Warna tersebut mengindikasikan bahwa prekursor Cu dan Sn telah terdispersi dengan dengan baik sehingga larutan homogen. Homogenitas larutan menjadi faktor penting karena dapat mempengaruhi keseragaman lapisan tipis yang dihasilkan pada tahap pelapisan

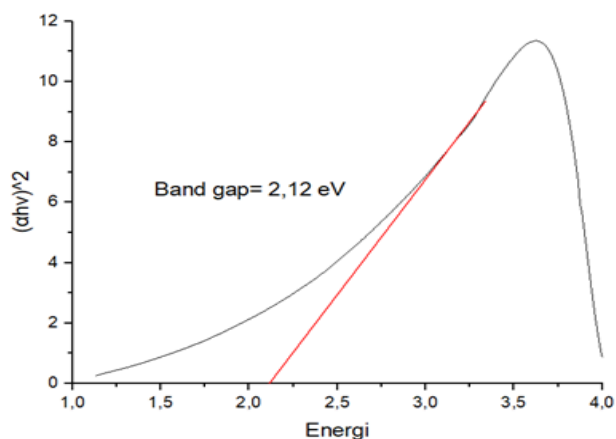
Proses pelapisan dilakukan menggunakan metode *spin-coating*. Metode *spin-coating* digunakan untuk mengontrol ketebalan lapisan (Kim *et al.*, 2018). Pada pelapisan ini menghasilkan lapisan tipis yang menutupi permukaan kaca secara merata. Proses kalsinasi pada suhu 550°C berperan untuk menghilangkan sisa pelarut dan senyawa lain yang terdapat dalam lapisan serta membantu pembentukan material CuSnO_3 . Setelah proses pengeringan dan kalsinasi pada suhu 550°C , lapisan yang terbentuk tampak transparan dan melekat dengan baik pada permukaan kaca. Transparansi lapisan mengindikasikan kemampuan material untuk mentransmisikan cahaya tampak. Material konduktif yang transparan memungkinkan cahaya mencapai lapisan aktif secara lebih efektif, sehingga material berpotensi diaplikasi pada DSSC (Liu *et al.*, 2021).

Karakterisasi CuSnO_3

UV-DRS (Ultraviolet-Visible Diffuse Reflectance Spectroscopy)

Karakterisasi UV-DRS digunakan untuk menentukan bandgap dari sampel. Bandgap merupakan sifat fotofisika mendasar yang mengatur perilaku optik dan elektroniknya, sehingga

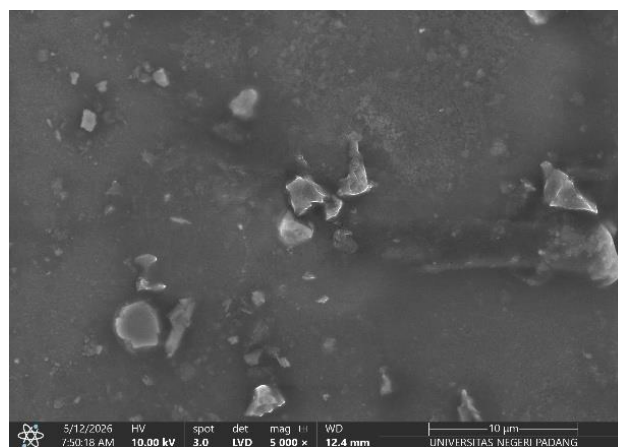
penentuan bandgap yang akurat sangat penting untuk pengembangan dan aplikasi semikonduktor, fotovoltaik, perangkat optoelektronik, dan fotokatalis (Pham *et al.*, 2025). Penentuan nilai bandgap menggunakan metode *tauc plot* yang merupakan menentukan bandgap suatu material berdasarkan panjang gelombang dan koefisien absorpsi dari spektrum serapannya (Kammar, 2024). Grafik dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar. 1. Grafik Bandgap CuSnO_3

Nilai bandgap dari lapisan tipis CuSnO_3 yaitu 2,12 eV. Berdasarkan teori CuSnO_3 memiliki bandgap sekitar 2,0-2,5 eV sehingga bandgap yang didapat masuk dalam rentang teori CuSnO_3 . Besarnya bandgap menentukan foton yang dapat dimanfaatkan. Semikonduktor dengan bandgap yang kecil mampu menangkap lebih banyak foton, sedangkan bandgap yang besar menangkap lebih sedikit foton (Hefeng Zhang, Jiaqi Liu, Ting Xu, Wenqian Ji, 2023). Material dengan celah pita yang sempit dapat menghantarkan listrik dengan baik dikarenakan celah pita yang sempit akan mempermudah loncatan elektron dari pita valensi ke pita konduksi (Aminullah *et al.*, 2019).

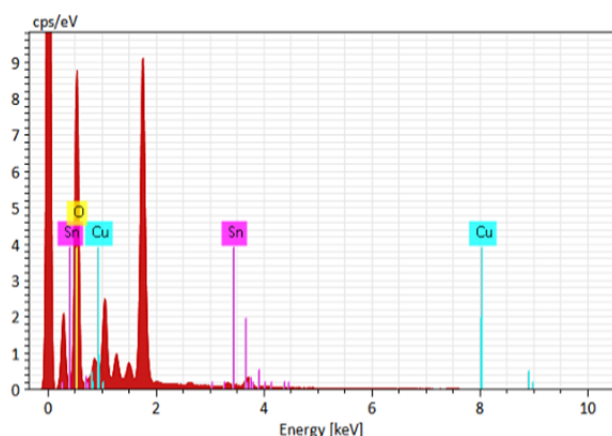
SEM-EDS (Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive Spectroscopy)



Gambar 2. Hasil SEM CuSnO_3 Perbesaran 10.000x

Tabel 1. Data EDS CuSnO_3

Element	Atomic Number	Net Counts	Norm. Mass Concentration (%)	Norm. Atomic Concentration (%)	1σ Uncertainty (mass%)	1σ Relative Uncertainty (%)
Oxygen	8	56.036	82.47	95.51	0.65	0.79
Copper	29	4.026	12.98	3.78	0.31	2.38
Tin	50	2.166	4.55	0.71	0.25	5.57
Sum			100.00	100.00		



Gambar 3. Spektrum EDS CuSnO_3

Kombinasi citra SEM dan peta EDS disebut analisis SEM-EDS yang dapat mengungkapkan hubungan antara mikrostruktur dan komposisi permukaan material (Kato *et al.*, 2025). SEM menggunakan pencitraan elektron sekunder untuk menganalisis topologi permukaan dan morfologi mineral pada skala mikron/nanometer. EDS berguna menganalisis spektrum energi untuk menentukan amplitudo elemen tertentu, dan sinyal listrik dihasilkan dari energi foton masing-masing. Hal ini dapat menghasilkan penentuan kualitatif dan kuantitatif peta komposisi kimia elemen yang terdapat pada sampel. Karakterisasi SEM-EDS digunakan untuk karakterisasi mineral (Ali *et al.*, 2023). Hasil karakterisasi SEM-EDS dapat dilihat pada Gambar 2.

Dari Gambar 2 tersebut dapat dilihat morfologi dari permukaan lapisan hasil sintesis yang diamati menggunakan SEM dengan perbesaran $10.000\times$. Berdasarkan hasil pengamatan, permukaan lapisan memperlihatkan partikel yang berbentuk tidak simetris, struktur yang saling menempel, serta ukuran partikel yang tidak homogen. Selanjutnya, hasil EDS terdapat pada Tabel 1 menunjukkan keberadaan unsur oksigen 82,47%, tembaga 12,98%, dan tin 4,55% dengan jumlah total 100%.

Karakterisasi TiO_2

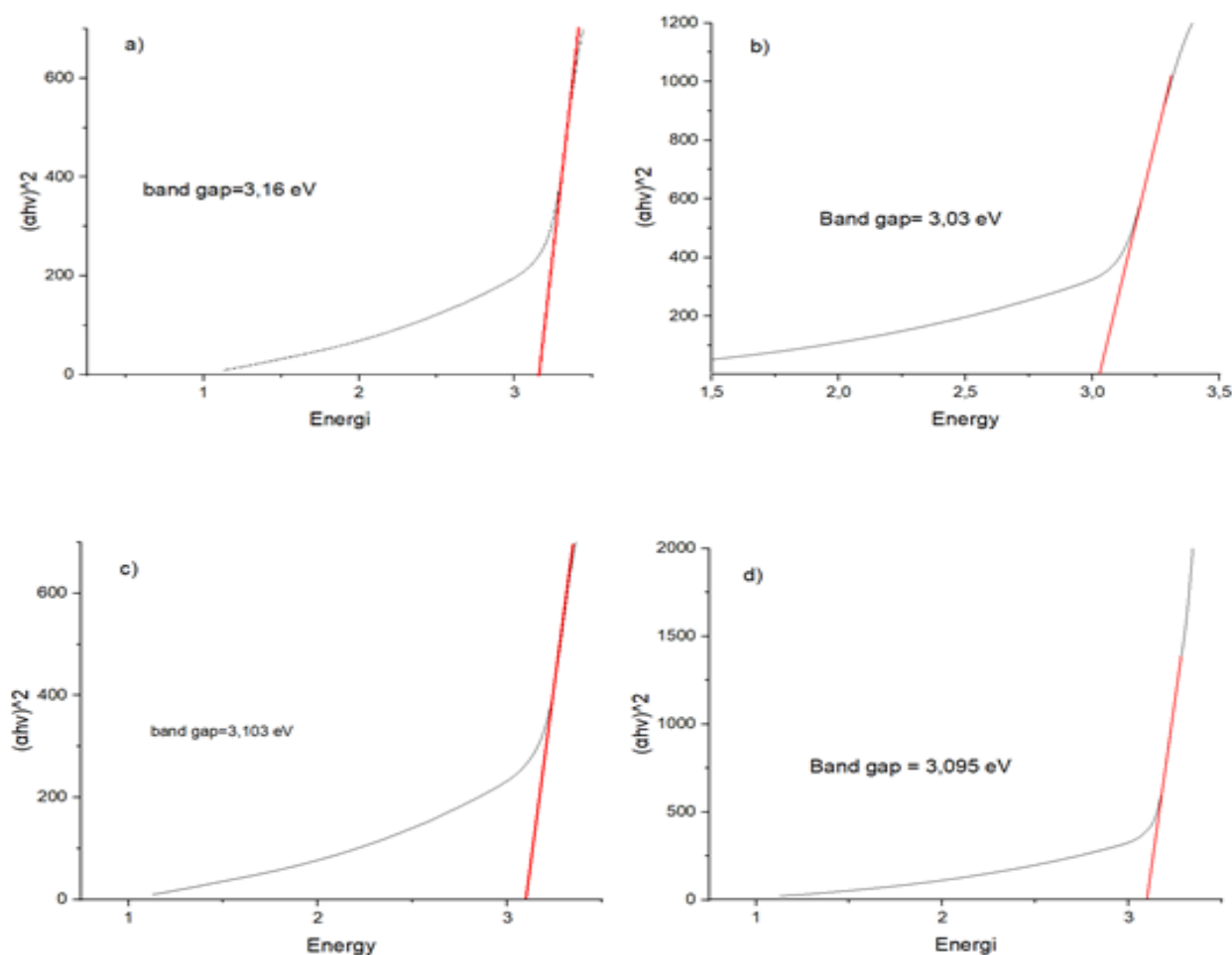
UV-DRS (Ultraviolet-Visible Diffuse Reflectance Spectroscopy)

Dilakukan juga karakterisasi dengan UV-DRS untuk menentukan nilai bandgap dari TiO_2 . Proses pelapisan memengaruhi ketebalan film, porositas luas permukaan dan *adsorpsi* pewarna dan transpor elektron. TiO_2 dilapisi pada kaca substrat menggunakan metode *doctor blade* yang memberikan lebih banyak keuntungan dibandingkan metode lain. Metode *doctor blade* memberikan pembentukan lapisan dengan ketebalan yang baik, dan kehilangan larutan dapat diminimalkan (Khairudin *et al.*, 2026). Hasil pelapisan menggunakan metode *doctor blade* menghasilkan lapisan yang tersebar merata pada permukaan substrat.

Pengujian dilakukan pada panjang gelombang 185-1100 nm. Variasi yang digunakan merupakan perubahan suhu kalsinasi terhadap nilai bandgap TiO_2 yaitu suhu kalsinasi 400°C, 450°C, 500 °C, dan 550°C. *Annealing* (kalsinasi) dapat meningkatkan kristalinitas dan berguna untuk memperbaiki morfologi TiO_2 (Safiay *et al.*, 2021). Pengaruh suhu kalsinasi berpengaruh terhadap sifat optik, struktur dan listrik lapisan tipis (Kanmaz, 2024). Nilai bandgap masing-masing suhu kalsinasi dihitung menggunakan metode *tauc plot* dapat dilihat pada Gambar 4.

Tabel 2. Data Bangap TiO_2

Suhu Kalsinasi (°C)	Bandgap (eV)
400	3.16
450	3.03
500	3.103
550	3.095



Gambar 1. Grafik Bandgap TiO_2 pada suhu kalsinasi a) 400°C, b) 450°C, c) 500°C, d) 550°C

Dari Tabel 2 dapat dilihat bahwasanya didapat bandgap minimum pada suhu 450°C yang diaplikasikan pada substrat kaca CuSnO_3 . Penurunan nilai bandgap dapat mengindikasikan perubahan struktur kristal atau konfigurasi elektronik material. Selain itu peningkatan suhu annealing juga dapat menyebabkan bertambahnya kluster atom akibat meningkatnya energi permukaan (Kanmaz, 2024). Bandgap yang lebih sempit dapat menyerap lebih banyak cahaya pada spektrum tampak, sehingga dapat meningkatkan jumlah elektron yang tereksitasi dan mengurangi laju rekombinasi sehingga dapat meningkatkan efisiensi konversi energi sel surya (Putri *et al.*, 2025).

SIMPULAN

Berdasarkan hasil dari penelitian ini, substrat DSSC menggunakan CuSnO_3 dapat dibuat melalui teknik sol-gel dan pelapisan putar (*spin coating*). Hasil analisis UV-DRS menunjukkan bahwa film tipis CuSnO_3 memiliki celah pita (*bandgap*) sebesar 2,12 eV, yang berada dalam batas teoritis untuk

CuSnO_3 , menunjukkan potensinya sebagai semikonduktor untuk keperluan DSSC. Analisis SEM menunjukkan struktur permukaan film tipis CuSnO_3 yang tidak rata dengan partikel-partikel yang saling berdekatan dan bervariasi ukurannya. Analisis EDS memverifikasi keberadaan unsur-unsur kunci dalam CuSnO_3 , termasuk oksigen, tembaga, dan timah.

Penilaian hambatan yang dilakukan dengan *Four-Point Probe* menunjukkan bahwa substrat CuSnO_3 memiliki nilai hambatan sebesar 458,89 Ω . Karakteristik listrik yang diperoleh menunjukkan bahwa material ini memiliki potensi sebagai alternatif substrat pada DSSC. Selain itu, perubahan suhu kalsinasi TiO_2 berdampak pada celah pita (bandgap) lapisan TiO_2 yang diaplikasikan pada substrat CuSnO_3 . Celah pita terendah tercatat pada suhu kalsinasi 450 °C, yaitu sebesar 3,03 eV. Penurunan celah pita ini menunjukkan bahwa material tersebut menjadi lebih mampu menyerap cahaya tampak, yang dapat meningkatkan eksitasi elektron dan meningkatkan efisiensi konversi energi pada DSSC. Oleh karena itu, suhu kalsinasi memainkan peran penting dalam menentukan

karakteristik optik substrat TiO₂ dan CuSnO₃, yang berpotensi memungkinkan material ini untuk menggantikan kaca konduktif dalam DSSC.

DAFTAR PUSTAKA

- Adeloye, A. O., Koudjina, S., Kumar, V., Tapala, K. C., Gbenou, J. D., & Chetti, P. 2025. One-pot synthesis, photophysical, electrochemical and molecular property of mixed-ligands ruthenium complex functionalities: Potential materials for dye-sensitized solar cells (DSSCs). *Dyes and Pigments*, 235(August 2024): 112626. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2024.112626>
- Ali, A., Zhang, N., & Santos, R. M. 2023. Applied sciences Mineral Characterization Using Scanning Electron Microscopy (SEM): A Review of the Fundamentals. *Advancements, and Research Directions*.
- Aminullah, M. W., Setiawan, H., Huda, A., Samaulah, H., Haryati, S., & Bustan, M. D. 2019. Pengaruh Komposisi Material Semikonduktor Dalam Menurunkan Energi Band Gap dan Terhadap Konversi Gelombang Mikro. *Jurnal EECCIS*, 13(2): 65–70.
- Devi Maryani, Gunawan, & Khabibib. 2012. Penentuan Efisiensi DSSC (Dye-Sensitized Solar Cell) yang Dibuat dari Semikonduktor ZnO yang Diemban Fe³⁺ Melalui Metode Presipitasi. *Jurnal Kimia Sains Dan Aplikasi*, 15(1): 29–35.
- Dihan Kurnia Saputra, Sherly Kasuma Warda Ningsih, H. 2015. Pengaruh Kecepatan Pengadukan ZnO Sebagai Lapis Ganda Pada Semikonduktor TiO₂-ZnO Terhadap Nilai Efisiensi Dye Sensitized Solar Cell. *M A S A L I Q Jurnal Pendidikan Dan Sains*, 5(5): 2227–2236. <https://doi.org/10.58578/masaliq.v5i5.694>
- Eddy, D. R., Permana, M. D., Sakti, L. K., Sheha, G. A. N., Solihudin, G. A. N., Hidayat, S., Takei, T., Kumada, N., & Rahayu, I. 2023. Heterophase Polymorph of TiO₂ (Anatase, Rutile, Brookite, TiO₂ (B)) for Efficient Photocatalyst: Fabrication and Activity. *Nanomaterials*, 13(4). <https://doi.org/10.3390/nano13040704>
- Fajrin, H. N., & Malik, A. 2023. Analisis Pengaruh Tegangan dan Hambatan Terhadap Kuat Arus dengan. *JFT: Jurnal Fisika Dan Terapannya*, 10: 76–85. <https://doi.org/10.24252/jft.v10i2.39275>
- Filiandini, N., & Sanjaya, H. 2025. Pengaruh Penambahan Zat Aditif Dea (Diethanolamine) dan Jumlah Pelapisan Spin-Coating Terhadap Nilai Band Gap Lapisan Tipis CuSnO₃. *Jurnal Pendidikan Tambusai*, 9: 3925–3935.
- Francis, O. I., & Ikenna, A. 2021. Review of Dye-Sensitized Solar Cell (DSSCs) Development. *Natural Science*, 13(12): 496–509. <https://doi.org/10.4236/ns.2021.1312043>
- Gnanamoorthy, G., Yadav, V. K., & Narayanan, V. 2020. Well organized assembly of (X)-CuSnO₃ nanoparticles enhanced photocatalytic and anti-bacterial properties. *Journal of Water Process Engineering*, 36(March): 101258. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101258>
- Hefeng Zhang, Jiaqi Liu, Ting Xu, Wenqian Ji, X. Z. 2023. Recent Advances on Small Band Gap Semiconductor Materials. *Catalysts*, 13(728): 1–30.
- Ika Nirmalasari, Ratri Ariatmi Nugrahani, B. 2022. Peningkatan Efisiensi Dye Sentsized Solar Cell (DSSC) dari Antosianin Kulit Manggis (*Garcinia mangostana* L) Menggunakan Papain. *Chimica et Natura Acta*, 10(2): 88–93. <https://doi.org/10.24198/cna.v10.n2.38011>
- Kanmaz, İ. 2024. Influence of Thermal Annealing on the Band-Gap of TiO₂ Thin Films Produced by the Sol-Gel Method Sol- Jel Yöntemiyle Üretilen TiO₂ İnce Filmlerinin Bant Aralığı Üzerinde Termal Tavlamanın Etkisi. *Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 5(1): 49–56. <https://doi.org/10.53501/rteufemud.1395013>
- Kato, T., Goto, K., Niwa, T., Shimizu, T., & Fujii, A. 2025. OPEN A comprehensive and quantitative SEM – EDS analytical process applied to lithium-ion battery electrodes. *Scientific Reports*, 25.
- Khairudin, A. R. M., Aziz, N. A. S., Rahman, M. Y. A., & Umar, A. A. 2026. Metal oxide and its modification as photoanode for dye - sensitized solar cell: a review. *J Mater Sci: Mater Electron*.
- Kidowaki, H., Oku, T., & Akiyama, T. 2012. Fabrication and characterization of CuO/ZnO solar cells. *Journal of Physics: Conference Series*, 352(1): 2–7. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/352/1/012022>
- Kim, B. N., Seo, G. K., Hwang, S. W., Yu, H., Ahn, B., Seo, H., & Cho, I. S. 2018. Photophysical properties and photoelectrochemical performances of sol-gel derived copper stannate (CuSnO₃) amorphous semiconductor for solar water splitting application. *Ceramics International*, 44(2): 1843–1849. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.10.119>
- Kumar, V., Kaphle, A., Rathnasekara, R., Neupane,

- G. R., & Hari, P. 2024. Role of Al doping in morphology and interface of Al-doped ZnO/CuO film for device performance of thin film-based heterojunction solar cells. *Hybrid Advances*, 5(February): 100148. <https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2024.100148>
- Liu, Z., Zou, Y., Ji, C., Chen, X., Hou, G., Zhang, C., Wan, X., Guo, L. J., Zhao, Y., & Zhang, X. 2021. Broad-Spectrum Ultrathin-Metal-Based Oxide / Metal / Oxide Transparent Conductive Films for Optoelectronic Devices. *ACS Applied Materials & Interfaces*. <https://doi.org/10.1021/acsami.1c16691>
- Maulina, A. 2014. Preparasi Dye Sensitized Solar Cell Menggunakan Ekstrak Antosianin Kulit Buah Manggis (*Garcinia Mangostana* L). *Jurnal Sainstek*, VI(2): 158–167.
- Pham, H., Neves, J. C., Yan, R., Pankratova, V., Cao, W., & Zhang, D. 2025. Improving Bandgap Determination by Optical Spectroscopy: Comparative Evaluation of ISARS, UV – vis, and Diffuse Reflectance. *ACS Measurement Science*, 5(666–676). <https://doi.org/10.1021/acsmeasuresciau.5c00059>
- Putri, A. A., Lina, R. G., Feronika, W., & Permatasari, P. 2025. Terapan Enhancing DSSC Performance through Metal- Doped TiO₂ and Poly-Tannin Dye: A Study on Bandgap Reduction and Photon Absorption. *J-TETA : Jurnal Teknik*, 4(1): 19–29.
- Rizka, F., & Sanjaya, H. 2023. Pengaruh DEA dan Waktu Dipping terhadap Nilai Band Gap Lapisan Tipis CuSnO₃. *Masaliq*, 3(6): 1347–1356. <https://doi.org/10.58578/masaliq.v3i6.2083>
- Roslan, N., Ya'acob, M. E., Radzi, M. A. M., Hashimoto, Y., Jamaludin, D., & Chen, G. 2018. Dye Sensitized Solar Cell (DSSC) greenhouse shading: New insights for solar radiation manipulation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 92: 171–186. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.095>
- Safiay, N. M., Rani, R. A., Ezira, N., Azhar, A., Khusaimi, Z., & Rusop, M. 2021. Influence of Different Annealing Temperatures on the Structural and Optical Properties of TiO₂ Nanoparticles Synthesized via Sol-Gel Method : Potential Application as UV Sensor. *Indones. J. Chem*, 21(2): 279–285. <https://doi.org/10.22146/ijc.52255>
- Srivastava, K. V., Srivastava, P., Srivastava, A., & Maurya, K. 2025. 1D TiO₂ photoanodes: a game-changer for high- efficiency dye-sensitized solar cells. *RSC Advances*, 15: 4789–4819. <https://doi.org/10.1039/d4ra06254j>
- Sugathan, V., John, E., & Sudhakar, K. 2015. Recent improvements in dye sensitized solar cells: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52: 54–64. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.076>
- Sun, X., Lin, H. I., Okumura, S., Zhang, L., & Watanabe, S. 2024. Interface structure of PN junctions in NiO–WO₃–FTO photoelectrode for efficient DSSCs and enhanced photoresponses. *Chemical Engineering Journal*, 502(October): 157972. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.157972>
- Umayya, D. R., & Hardeli, H. 2023. Peningkatan Efisiensi Dye Sensitized Solar Cell (Dssc) Menggunakan Poli Tanin. *CHEDS: Journal of Chemistry, Education, and Science*, 7(2): 216–220. <https://doi.org/10.30743/cheds.v7i2.8183>
- Warembra, R. S., & Betaubun, P. 2018. Analysis of Electrical Properties Using the four point Probe Method. *E3S Web of Conferences*, 73: 1–4. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20187313019>
- Wisz, G., Sawicka-Chudy, P., Sibiński, M., Starowicz, Z., Płoch, D., Góral, A., Bester, M., Cholewa, M., Woźny, J., & Sosna-Głębska, A. 2021. Solar cells based on copper oxide and titanium dioxide prepared by reactive direct-current magnetron sputtering. *Opto-Electronics Review*, 29(3): 97–104. <https://doi.org/10.24425/opelre.2021.139039>
- Xu, J., Wen, Y., Chang, Q., Hao, T., & He, T. 2024. Enhancement of Photoelectric Conversion Efficiency in Dye-Sensitized Solar Cells Using SnO₂ – TiO₂ Composite Nanofibers. *AATCC Journal of Research*, 11(5): 386–398. <https://doi.org/10.1177/24723444241257543>
- Yasu, R. M., & Hadi, C. F. 2021. Pengaruh Tegangan Terhadap Besar Kuat Arus Listrik Pada Persamaan Hukum Ohm. *Zetroem*, 03(01): 34–36.