

SINTESIS DAN KARAKTERISASI TiO₂ - Cu DENGAN METODE GREEN SYNTHESIS EKSTRAK KULIT JERUK PADA APLIKASI DSSC

¹⁾Adinda Priskia Cahya Putri, ²⁾Adawiyah Nuurul Aini, ³⁾Galuh Aryseno, ⁴⁾Anis Safaatul Rohmah, ⁵⁾M. Hoiron, ⁶⁾Evi Suaebah, ⁷⁾Ersyzario Edo Yunata

- ¹⁾ Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: adinda.23027@mhs.unesa.ac.id
- ²⁾ Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: adawiyah.23053@mhs.unesa.ac.id
- ³⁾ Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: galuh.23124@mhs.unesa.ac.id
- ⁴⁾ Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: anis.23030@mhs.unesa.ac.id
- ⁵⁾ Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: hoiron.23121@mhs.unesa.ac.id
- ⁶⁾ Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: evisuaebah@unesa.ac.id
- ⁷⁾ Program Studi Fisika, FST, Universitas Airlangga, email: ersyzario.edo@fst.unair.ac.id

Abstrak

Peningkatan kebutuhan energi listrik di Indonesia mendorong pengembangan teknologi energi terbarukan, termasuk Dye-Sensitized Solar Cell (DSSC). Penelitian ini bertujuan mensintesis dan mengkarakterisasi material TiO₂-Cu menggunakan metode *green synthesis* berbasis ekstrak kulit jeruk (*Citrus sinensis*) sebagai agen pereduksi alami. Proses sintesis meliputi preparasi ekstrak kulit jeruk, pembentukan TiO₂ nanopartikel melalui reaksi TTIP-ekstrak, komposit Cu, serta kalsinasi pada 500°C. Karakterisasi FTIR menunjukkan pita serapan khas Ti-O dan Ti-O-Ti pada rentang 426-569 cm⁻¹, serta gugus -OH dan sisa biomolekul organik yang menegaskan keberhasilan sintesis hijau. Analisis UV-Vis menghasilkan nilai *band gap* TiO₂ sebesar 4,1 eV, menunjukkan karakter semikonduktor anatase dengan respons optik dominan pada wilayah ultraviolet. Uji performa DSSC yang difabrikasi menggunakan komposit TiO₂-Cu dan dye alami daun ketapang menghasilkan nilai *open-circuit voltage* (Voc) sebesar 0,479 V, *short-circuit current* (Isc) 0,02 mA, dan efisiensi konversi energi 0,00426%. Hasil ini mengonfirmasi bahwa ekstrak kulit jeruk berperan sebagai bioreduktor efektif dalam pembentukan TiO₂-Cu, namun performa fotovoltaiik masih rendah sehingga diperlukan optimasi lanjutan terkait morfologi, struktur pita energi, dan kompatibilitas dye. Penelitian ini menunjukkan potensi pemanfaatan limbah biomassa sebagai prekursor ramah lingkungan dalam pengembangan fotoanoda DSSC berbasis energi hijau.

Kata Kunci: TiO₂-Cu, *green synthesis*, kulit jeruk, DSSC, fotoanoda

Abstract

The increasing demand for electrical energy in Indonesia highlights the need for the development of renewable technologies such as Dye-Sensitized Solar Cells (DSSC). This study aims to synthesize and characterize TiO₂-Cu materials using a *green synthesis* approach employing orange peel extract (*Citrus sinensis*) as a natural reducing agent. The synthesis process involved extract preparation, TiO₂ nanoparticle formation via TTIP-extract reaction, Cu incorporation, and calcination at 500°C. FTIR characterization confirmed the formation of Ti-O and Ti-O-Ti bonding at 426-569 cm⁻¹, accompanied by -OH groups and residual organic biomolecules, indicating the successful formation of TiO₂ via a green route. UV-Vis analysis showed a *band gap* of 4.1 eV, consistent with anatase-type semiconductors with dominant UV absorption. DSSC performance testing using TiO₂-Cu composite photoanodes and natural ketapang leaf dye yielded an *open-circuit voltage* (Voc) of 0,479 V, a *short-circuit current* (Isc) of 0,02 mA, and a power conversion efficiency of 0.00426%. These results demonstrate that orange peel extract functions effectively as a bioreducing agent for TiO₂-Cu formation; however, the photovoltaic performance remains low, requiring further optimization of morphology, electronic structure, and dye compatibility. Overall, this study highlights the potential of biomass waste as an eco-friendly precursor for developing green-based DSSC photoanodes.

Keywords: TiO₂-Cu, *green synthesis*, orange peel extract, DSSC, photoanode

I. PENDAHULUAN

Kebutuhan listrik di Indonesia meningkat seiring dengan perkembangan zaman dan pertumbuhan ekonomi global penduduk. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) menyampaikan bahwa konsumsi listrik mencapai 1285 kWh/kapita yang mengalami kenaikan dari tahun sebelumnya yang hanya sebesar 1173 kWh/kapita. Dengan meningkatnya kebutuhan listrik oleh perkembangan zaman dan teknologi global membuat kebutuhan listrik terutama di Indonesia meningkat sehingga pada tahun 2024 mencapai 1408 kWh/kapita, selain itu keberadaan bahan bakar fosil sebagai sumber energi utama untuk pembangkit listrik semakin menipis. Penggunaan bahan bakar fosil ini menjadi ketergantungan yang menyebabkan masalah lingkungan seperti emisi karbon dan pemanasan global, sehingga penggunaan energi alternatif perlu dikembangkan di Indonesia salah satunya yang dapat dikembangkan adalah energi surya. Indonesia sendiri memiliki iklim tropis yang terletak di garis khatulistiwa dan menerima intensitas sinar matahari yang tinggi sepanjang tahun sehingga cocok dalam pengembangan sel surya, (Assalam, *et al.*, 2024). Untuk memenuhi kebutuhan energi tersebut, Indonesia dianggap memiliki potensi pengembangan teknologi energi berbasis sel surya (solar cell) di Indonesia sangat besar (Karim *et al.*, 2019). Energi surya merupakan energi yang bersumber dari radiasi matahari yang dimanfaatkan untuk menghasilkan panas atau listrik melalui berbagai teknologi seperti panel surya (fotovoltaik) dan sistem pemanas surya (Afif, *et al.*, 2022).

Wilayah di Indonesia memiliki potensi dari paparan radiasi sinar matahari, Pemanfaatan PLTS di Indonesia menunjukkan potensi besar dalam mendukung elektrifikasi wilayah 3T (Terdepan, Terluar, Tertinggal) dan transisi energi bersih (Kadang, *et al.*, 2021). Namun, masih terdapat kendala seperti biaya investasi awal yang tinggi, efisiensi sel surya rendah, keterbatasan teknis, serta regulasi yang belum mendukung iklim investasi secara optimal. Skema harga listrik dan insentif yang tidak kompetitif juga menghambat pengembangan PLTS, baik skala rumah tangga maupun skala besar (Bayu, *et al.*, 2021). Oleh karena itu dibutuhkan inovasi teknologi yang mendukung pengembangan sel surya yang signifikan dengan pemanfaatan fotoanoda pada sel surya yang diperlukan modifikasi pada fotoanoda sebagai komponen utama penangkap cahaya. Dalam konteks ini, penelitian *green synthesis* material semikonduktor TiO_2 yang dimodifikasi dengan ekstrak daun kelor menjadi sangat relevan, karena tidak hanya ramah lingkungan tetapi juga berpotensi meningkatkan efisiensi konversi cahaya melalui peningkatan luas permukaan, stabilitas, dan kemampuan adsorpsi pewarna. Kombinasi material ini diharapkan dapat menjadi solusi inovatif dalam mendukung pengembangan teknologi energi surya yang berkelanjutan di Indonesia.

Riset ini dilatar belakangi oleh kebutuhan untuk mengembangkan material nanokomposit TiO_2 sebagai fotoanoda dengan pendekatan *green synthesis*, menggunakan ekstrak kulit jeruk sebagai agen pereduksi alami (Yuliarto, B., & Wardhana, S. 2020). Fenomena ini menjadi penting mengingat limbah kulit jeruk yang melimpah di Indonesia belum dimanfaatkan secara optimal. Berdasarkan data dari Kementerian Pertanian RI (2024), produksi jeruk di Indonesia mencapai 2,65 juta ton per tahun, dengan sebagian besar limbah kulitnya tidak termanfaatkan. Senyawa bioaktif dalam kulit jeruk, seperti flavonoid, asam askorbat, dan limonene, memiliki potensi sebagai agen bioreduktor dan penstabil nanopartikel yang ramah lingkungan (Umme Hani *et al.*, 2024). Penggunaan ekstrak alami mampu mengontrol ukuran dan morfologi nanopartikel TiO_2 , namun belum banyak yang mengintegrasikan SiO_2 ke dalam sistem tersebut, padahal SiO_2 dapat meningkatkan luas permukaan dan memperlambat rekombinasi muatan dalam DSSC.

II. METODE

A. *Green Synthesis* TiO_2 Nanoparticles

Integrasi nanomaterial yang disintesis secara ramah lingkungan dengan proses lingkungan menawarkan strategi menjanjikan untuk mengurangi kontaminan antropogenik dalam ekosistem (Rosaline *et al.*, 2025). *Green synthesis* dapat dilakukan dengan menggunakan berbagai sumber bahan alami, termasuk tanaman, mikroorganisme, dan bahan limbah organik. Metode ini melibatkan ekstraksi senyawa-senyawa

aktif dari bahan alami yang kemudian digunakan sebagai reduktor, agen penstabil, atau pengatur ukuran dalam sintesis nanopartikel (Maiaugree et al., 2015). *Green synthesis* nanokomposit TiO₂ umumnya memanfaatkan biomolekul dari ekstrak tumbuhan (polifenol, asam organik, flavonoid, protein) sebagai reduktor, penstabil (*capping*), dan *templating* yang menggantikan reagen toksik pada rute sol-gel, ko-presipitasi, atau hidrotermal; setelah pencampuran prekursor Ti (IV) dengan ekstrak, terjadi nukleasi-pertumbuhan partikel hibrida yang kemudian dikalsinasi ringan untuk memperoleh fasa anatase TiO₂ yang saling terhubung. Strategi ini terbukti menghasilkan heterostruktur TiO₂ yang ramah lingkungan dengan ukuran nano, luas permukaan tinggi, dan memperluas respons optik berdampak pada peningkatan aktivitas fotokatalitik (degradasi zat warna, antibakteri) dan performa perangkat seperti DSSC. Integrasi nanomaterial yang disintesis secara ramah lingkungan dengan proses lingkungan menawarkan strategi menjanjikan untuk mengurangi kontaminan antropogenik dalam ekosistem.

Green-synthesized TiO₂ menunjukkan sejumlah keunggulan penting sebagai material fotoanoda untuk *Dye-Sensitized Solar Cell* (DSSC). Nanopartikel TiO₂ yang dibuat menggunakan ekstrak tanaman termasuk ekstrak kulit buah atau ekstrak herbal umumnya memiliki ukuran partikel kecil pada rentang 20–100 nm dengan struktur kristal anatase yang stabil, sehingga memberikan luas permukaan dan porositas yang lebih besar. Karakteristik ini meningkatkan kemampuan adsorpsi dye, yang merupakan langkah kunci dalam penyerapan cahaya dan injeksi elektron pada DSSC. Selain itu, struktur kristal berkualitas dan mobilitas elektron yang baik pada TiO₂ hasil sintesis hijau berkontribusi pada transport elektron yang lebih efisien dari dye menuju elektroda, sehingga mendukung peningkatan efisiensi konversi daya. Metode *green synthesis* juga menawarkan keuntungan praktis berupa proses yang lebih ramah lingkungan, biaya produksi rendah, dan penggunaan bahan alami yang mudah diperoleh. Kombinasi sifat optik, morfologi nanometer, porositas tinggi, dan keberlanjutan ini membuat TiO₂ hasil *green synthesis* menjadi kandidat yang sangat potensial untuk aplikasi fotoanoda DSSC (Mustaghfiri, M. A., & Munasir. 2023).

B. *Dye-Sensitizer Solar Cells Nanopartikel TiO₂*

Dye-Sensitized Solar Cell (DSSC) merupakan salah satu teknologi sel surya generasi ketiga yang dikembangkan sebagai alternatif dari sel surya berbasis silikon. DSSC bekerja dengan prinsip menyerupai proses fotosintesis alami, di mana zat pewarna (dye) berfungsi sebagai penyerap cahaya dan melepaskan elektron untuk menghasilkan arus (Reza Keshavarzi et al., 2015). DSSC terdiri dari elektroda kerja, elektroda pembanding, lapisan semikonduktor, lapisan aktif dye, dan larutan elektrolit. Dalam DSSC, elektroda kerja dilapisi oleh semikonduktor yang tersensitisasi oleh molekul zat pewarna (*dye*) yang berfungsi sebagai penangkap foton cahaya (Shanavas et al., 2019). DSSC berpotensi menjadi solusi energi terbarukan yang dapat diadopsi secara luas di masa depan, terutama di negara berkembang yang memiliki potensi biomassa tinggi namun akses teknologi yang terbatas (Keeya Madani et al., 2020).

C. Mekanisme *Green Synthesis Nanopartikel TiO₂*

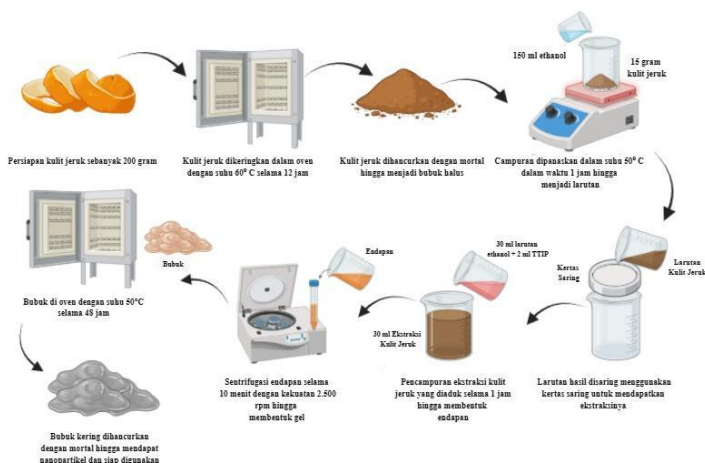
1. Preparasi Ekstrak Tanaman

Kulit jeruk (*Citrus Cell*) dikumpulkan dan dibersihkan dengan air mengalir untuk membersihkan kotoran yang menempel. Kulit jeruk segar sekitar 200 gram dikeringkan menggunakan oven pada suhu 60°C selama 48 jam dan dihaluskan hingga menjadi serbuk halus. Setelah itu, mencampurkan bubuk kulit jeruk 15 gram dengan ethanol sebanyak 150 mL dan di stirrer selama 1 jam pada suhu 60°C dengan kecepatan 440 RPM, larutan hasil ekstrak ini di disaring menggunakan kertas filter untuk mengambil hasil ekstrak dan membuang ampas nya.

2. Sintesis Hijau TiO₂

Nanopartikel TiO₂ dibuat menggunakan *magnetic stirrer* dengan mencampurkan 20 ml larutan ekstrak kulit jeruk dengan 100 ml TTIP dengan perbandingan 1:5 lalu diaduk menggunakan magnetic stirrer selama 1 jam dengan kecepatan 650 rpm dengan suhu pengadukan 450°C. Hasil dari pencampuran itu diambil endapannya menggunakan alat sentrifugasi dengan kecepatan 2500 rpm selama 10 menit dan dilakukan berulang hingga endapan bersih dengan mencampurkan etanol. Setelah terbentuk endapan di masukan

dalam cawan petri lalu dikeringkan menggunakan oven pada suhu 100°C selama 30 menit, setelah kering bubuk TiO_2 -NPs di *furnace* selama 2 jam dengan suhu 500°C (Putri et al., 2024).



Gambar 1. Skema Green Synthesis Nanopartikel TiO_2

3. TiO_2 NPS - Cu

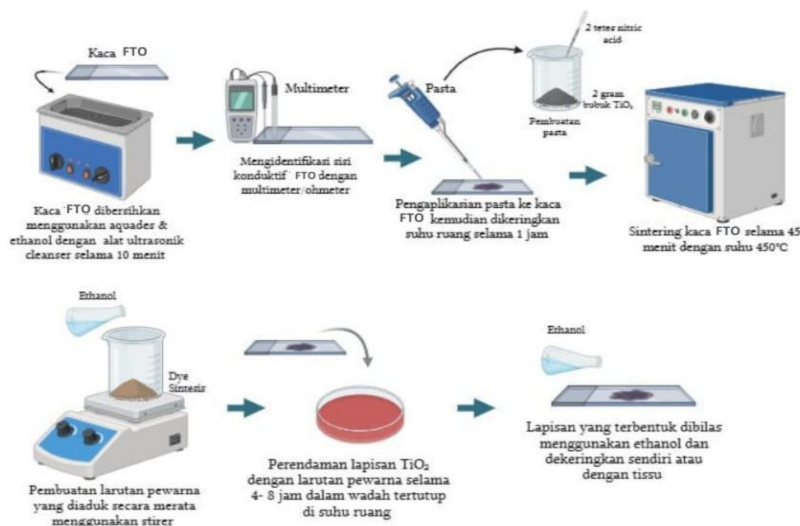
Menyiapkan 2 mL prekursor titanium isopropoksida (TTIP) yang kemudian dicampurkan dengan air deionisasi untuk memulai pembentukan larutan dasar TiO_2 . Setelah itu, larutan TTIP dicampurkan dengan larutan ekstrak alami dan larutan Cu dengan konsentrasi 0,45 M. Campuran ini diaduk merata dan dibiarkan bereaksi selama kurang lebih 3 jam untuk memastikan proses homogenisasi berjalan dengan baik. Selanjutnya, campuran hasil reaksi didiamkan semalam pada suhu ruang agar terjadi proses pengendapan sempurna. Setelah didiamkan, larutan disentrifugasi dengan kecepatan 4000 rpm selama 20 menit untuk memisahkan endapan dari supernatan. Endapan yang diperoleh kemudian dikeringkan menggunakan oven pada suhu 80°C selama 6 jam untuk menghilangkan sisa pelarut dan air. Tahap akhir adalah proses kalsinasi yang dilakukan pada suhu 500°C selama 2 jam untuk mengubah endapan menjadi serbuk kristalin TiO_2 yang telah terdoping Cu. Hasil akhirnya berupa serbuk TiO_2 : Cu yang siap digunakan sebagai material semikonduktor atau fotoanoda dalam berbagai aplikasi, seperti *Dye-Sensitized Solar Cell* (DSSC).

4. Pelarutan Dye

Daun ketapang dikeringkan terlebih dahulu hingga kadar airnya berkurang menggunakan oven dengan suhu 250°C selama 3 jam, kemudian digiling menggunakan blender hingga halus. Setelah itu, serbuk daun hasil gilingan direndam dalam etanol 99% dengan perbandingan 2 gram serbuk daun dalam 30 mL etanol. Proses perendaman dilakukan selama 2×24 jam agar senyawa aktif dan zat warna dari daun dapat terekstraksi dengan baik ke dalam pelarut etanol. Setelah perendaman selesai, campuran disaring untuk memisahkan ampas daun dari larutan hasil ekstraksi. Tahap berikutnya adalah distilasi, yang bertujuan untuk memisahkan pelarut etanol dari ekstrak zat warna dengan cara memanaskan larutan hingga terjadi penguapan etanol. Proses ini dilakukan hati-hati agar tidak merusak senyawa aktif yang terkandung di dalam ekstrak. Hasil dari tahap distilasi berupa cairan pekat yang berwarna dan sudah tidak mengandung etanol (Prayitno et al., 2023).

5. Fabrikasi DSSC

Kaca FTO dibersihkan menggunakan larutan etanol dan aquades dengan alat ultrasonik *cleaner* selama 10 menit. Kemudian mengidentifikasi sisi kaca menggunakan multimeter dan selotip kaca sebagai batas area. Pembuatan pasta dengan mencampurkan 2 gram bubuk TiO_2 -NPs dan 2 tetes *nitric acid*. Pengaplikasian pasta ke kaca FTO menggunakan metode *doctor blade* dan dikeringkan pada suhu ruang selama 1 jam. Sintering kaca FTO selama 45 menit dengan suhu 450°C . kemudian kaca direndam dengan larutan pewarna selama 4-8 jam dalam wadah tertutup di suhu ruang. Lapisan yang terbentuk dibilas dengan etanol dan di dibersihkan dengan tisu.



Gambar 2. Skema Proses Fotoanoda

Selanjutnya pengaplikasian *counter* elektroda dengan memanaskan kaca FTO pada alat pemanas hingga suhu 200°C . Selanjutnya carbon cair ditetaskan secara merata pada bagian kaca. Lapisan *carbon* tersebut dipanaskan dalam oven pada suhu 450°C selama 45 menit. *Counter* elektroda yang dilapisi karbon diletakkan diatas lapisan substrat foto elektroda, sehingga terbentuk struktur *sandwich*. Kemudian, dilakukan penetesan larutan elektrolit di kedua kaca. Terakhir uji menggunakan multimeter.

Gambar 3. Skema proses *counter* elektroda pada kaca FTO

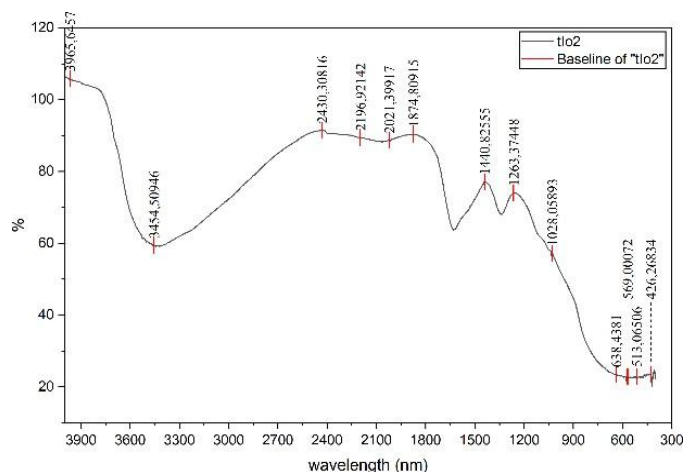
III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Uji FTIR

Ekstrak kulit jeruk digunakan sebagai pembuatan TiO_2 melalui metode *green synthesis*. hasil serbuk tersebut dianalisis menggunakan *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) untuk mengkarakterisasi gugus fungsi suatu senyawa yang terbentuk pada TiO_2 yang sudah dibuat. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui pola serapan vibrasi molekul dan perubahan gugus organik sebelum dan setelah proses kalsinasi. Berdasarkan riset yang telah dilakukan data FTIR menunjukkan seperti terlihat pada **Gambar 4**.

Pada hasil uji FTIR pada rentang bilangan gelombang $400\text{--}4000\text{ cm}^{-1}$ terlihat beberapa pita serapan utama yang terbentuk pada sampel TiO_2 hasil *green synthesis*. Terlihat pita serapan kuat pada daerah sekitar $426\text{--}569\text{ cm}^{-1}$ yang merupakan pita karakteristik vibrasi Ti-O dan Ti-O-Ti, sehingga mengindikasikan bahwa struktur TiO_2 telah terbentuk. Hal ini sesuai dengan data literatur dimana vibrasi ikatan Ti-O umumnya berada pada rentang $400\text{--}700\text{ cm}^{-1}$. Selain itu pada daerah $3400\text{--}3600\text{ cm}^{-1}$ teramati adanya pita serapan yang merepresentasikan gugus -OH dari air teradsorpsi atau hidroksil permukaan. Pita di sekitar $1440\text{--}1263\text{ cm}^{-1}$ menunjukkan vibrasi C-H dan C-O dari senyawa organik yang tersisa, yang berasal dari biomolekul tanaman

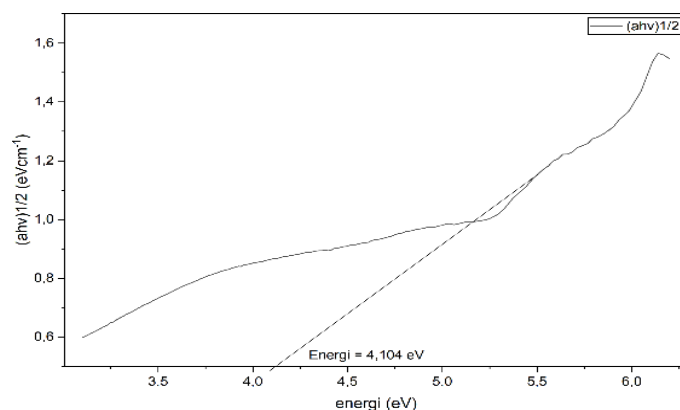
yang berperan sebagai agen reduktor dan stabilizer pada proses sintesis hijau. Keberadaan pita serapan Ti-O yang jelas pada daerah $< 700 \text{ cm}^{-1}$ menunjukkan bahwa proses green synthesis berhasil membentuk TiO_2 . struktur TiO_2 telah terbentuk dan bahwa sebagian besar residu organik telah berkurang setelah proses sintesis dan perlakuan lebih lanjut.



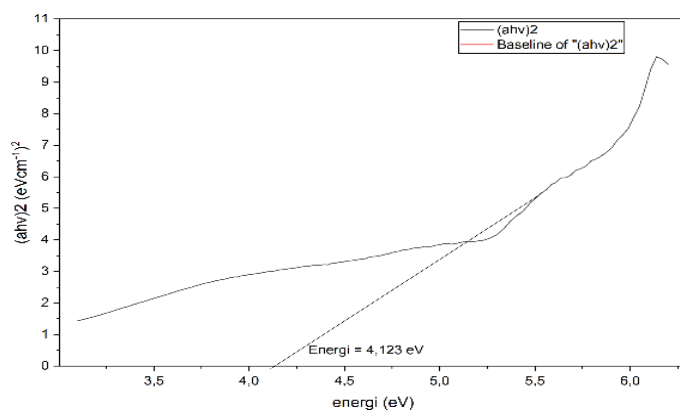
Gambar 4. Grafik Hasil Uji FTIR

B. Hasil Uji UV-Vis TiO_2

Energi celah pita (*band gap energy*) merupakan parameter fundamental yang menentukan kemampuan suatu material semikonduktor dalam menyerap cahaya dan mengkonversinya menjadi energi listrik. Pada sistem *Dye-Sensitized Solar Cell* (DSSC), besar kecilnya nilai *band gap* dari fotoanoda sangat mempengaruhi efisiensi penyerapan foton serta laju transfer elektron dari *dye* menuju pita konduksi semikonduktor.



Gambar 5. Grafik Uv-Vis $\text{AHV}^{1/2}$

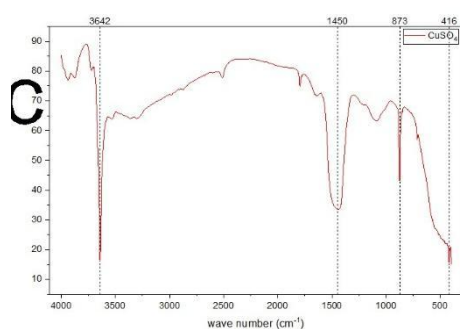


Gambar 6. Grafik UV-Vis AHV^2

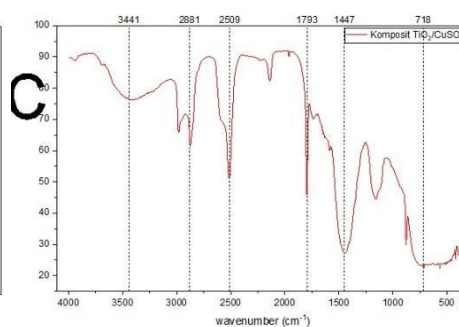
Berdasarkan **Gambar 5**, diperoleh nilai energi celah pita sebesar 4,104 eV untuk transisi tidak langsung. Nilai ini menunjukkan bahwa TiO_2 yang dihasilkan memiliki karakteristik semikonduktor dengan kemampuan absorpsi pada wilayah ultraviolet. Besarnya nilai *band gap* ini mengindikasikan bahwa proses transisi elektron memerlukan energi yang relatif tinggi untuk berpindah dari pita valensi ke pita konduksi, yang khas bagi struktur anatase atau campuran *anatase-rutile* dengan ukuran partikel nanometer. Kurva ini dikenal sebagai plot Tauc.

Sementara itu, hasil analisis pada **Gambar 6** transisi langsung menghasilkan nilai energi celah pita sebesar 4,123 eV. Nilai ini tidak berbeda jauh dengan hasil pada transisi tidak langsung, yang menunjukkan bahwa struktur TiO_2 memiliki dominasi pita energi yang relatif lebar dengan sedikit pengaruh cacat kristal atau dopan yang dapat menurunkan *band gap*. Perbedaan kecil antara nilai *band gap direct* dan *indirect* menunjukkan bahwa material memiliki sifat optik yang cukup baik untuk digunakan sebagai fotoanoda DSSC, namun efisiensi serapan cahaya tampak masih terbatas pada wilayah UV. Untuk meningkatkan respons spektral ke wilayah cahaya tampak, diperlukan modifikasi lanjutan seperti doping logam transisi (misalnya Cu, Fe, atau Ni) atau *sensitization* menggunakan *dye* dengan spektrum serapan yang lebih lebar. Peningkatan *band gap* dapat disebabkan oleh efek ukuran partikel (*quantum confinement effect*) yang terjadi ketika ukuran kristalit atau partikel TiO_2 berada pada skala nanometer yang sangat kecil. Pada kondisi ini, pergerakan elektron menjadi lebih terbatas sehingga tingkat energi pita konduksi dan pita valensi mengalami pergeseran, yang mengakibatkan pelebaran celah energi. Faktor lain yang dapat menyebabkan nilai *band gap* terukur lebih tinggi adalah adanya pengaruh metode sintesis, perlakuan termal, komposisi kimia material maupun Keberadaan pengotor. Peningkatan *band gap* ini menunjukkan bahwa energi yang dibutuhkan untuk eksitasi elektron dari pita valensi ke pita konduksi menjadi lebih besar, sehingga material cenderung menyerap radiasi pada wilayah panjang gelombang yang lebih pendek.

C. Hasil Uji Komposit TiO_2Nps - CuSO_4



Gambar 7. Grafik CuSO_4



Gambar 8. Komposit TiO_2 - CuSO_4

Spektrum FTIR CuSO_4 murni menunjukkan beberapa pita serapan khas yang menegaskan keberadaan gugus sulfat (SO_4^{2-}) dalam struktur senyawa tersebut. Pita pada 873 cm^{-1} merupakan vibrasi ulur asimetris (ν_3) dari gugus S-O, sedangkan pita pada 1450 cm^{-1} menunjukkan vibrasi ulur simetris (ν_1) dari gugus sulfat, keduanya sesuai dengan karakteristik umum senyawa berbasis sulfat. Sementara itu, pita pada 416 cm^{-1} menandakan vibrasi tekuk dari ikatan Cu-O, yang menunjukkan interaksi kuat antara ion Cu^{2+} dengan oksigen baik dari gugus sulfat maupun molekul air hidrat. Ketiga puncak ini saling mendukung dalam mengonfirmasi keberadaan struktur anorganik CuSO_4 yang stabil. Pita serapan pada 3642 cm^{-1} menunjukkan vibrasi ulur gugus -OH, yang berasal dari molekul air hidrat (H_2O) yang masih terikat dalam struktur CuSO_4 . Kehadiran pita ini mengindikasikan bahwa sampel berada dalam bentuk hidrat, bukan anhidrat, yang sesuai dengan sifat higroskopis CuSO_4 . Secara keseluruhan, pola serapan yang muncul sesuai dengan data literatur mengenai vibrasi khas gugus sulfat dan ikatan Cu-O, serta tidak menunjukkan adanya puncak asing. Dengan demikian, spektrum FTIR tersebut mengonfirmasi bahwa sampel CuSO_4 yang digunakan berada dalam kondisi murni dan sesuai dengan karakteristik senyawa sulfat hidrat.

Spektrum FTIR komposit $\text{TiO}_2/\text{CuSO}_4$ menunjukkan beberapa pita khas yang menggambarkan keberhasilan pembentukan material komposit tersebut. Pita serapan kuat pada wilayah $400\text{--}700\text{ cm}^{-1}$

merupakan vibrasi ulur (stretching) dari ikatan Ti-O dan Ti-O-Ti, yang menjadi ciri utama struktur TiO₂ dan mengonfirmasi bahwa fase oksida titanium tetap mendominasi material. Selain itu, keberadaan CuSO₄ ditunjukkan oleh munculnya atau menguatnya pita pada kisaran 600–650 cm⁻¹ serta 1100–1150 cm⁻¹ yang berasal dari vibrasi ulur gugus S-O dari ion sulfat (SO₄²⁻). Pita ini memberikan bukti bahwa CuSO₄ tidak hanya hadir secara fisik, tetapi juga berinteraksi dengan permukaan TiO₂ sehingga terbentuk hubungan komposit yang stabil. Di sisi lain, pita serapan pada 3200–3500 cm⁻¹ dan 1600–1650 cm⁻¹ merupakan tanda adanya vibrasi -OH yang biasanya berasal dari molekul air teradsorpsi atau gugus hidroksil pada permukaan TiO₂. Keberadaan gugus -OH ini umum muncul pada material berbasis oksida logam dan berperan penting dalam proses fotokatalitik karena dapat menjadi pusat aktif bagi reaksi radikal. Secara keseluruhan, kombinasi pita yang muncul pada spektrum FTIR menunjukkan bahwa struktur dasar TiO₂ tetap terjaga, ion sulfat dari CuSO₄ berhasil terintegrasi, dan adanya gugus -OH memperkuat indikasi bahwa komposit TiO₂/CuSO₄ telah terbentuk dengan baik serta memiliki potensi untuk meningkatkan aktivitas fotokatalitik maupun fungsi lain yang diharapkan dari material komposit tersebut.

D. Konstruksi DSSC

Ekstrak kulit jeruk manis (*Citrus sinensis*) menunjukkan sifat fisik dan kimia yang relevan untuk aplikasi sebagai sensitizer atau aditif dalam pengembangan fotoanoda DSSC. Secara visual, ekstrak ini memiliki warna kuning pucat hingga orange cerah, yang mengindikasikan keberadaan senyawa kromofor alami yang mampu menyerap cahaya terutama pada daerah tampak. Warna tersebut erat kaitannya dengan kandungan bioaktif utama seperti flavonoid, saponin, tanin, dan limonene. Flavonoid, khususnya, diketahui memiliki struktur konjugasi yang memungkinkan terjadinya transisi elektron ketika terkena cahaya, sehingga berpotensi meningkatkan kemampuan penyerapan foton pada DSSC. Saponin dan tanin berkontribusi pada kestabilan kimia serta interaksi permukaan dengan material semikonduktor, sementara limonene berperan sebagai senyawa volatil yang dapat memengaruhi morfologi lapisan TiO₂ selama proses fabrikasi.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa DSSC yang difabrikasi pada penelitian ini menghasilkan nilai tegangan rangkaian terbuka (Voc) sebesar 0,479 V, arus hubung singkat (Isc) sebesar 0,02 mA, dan efisiensi DSSC sebesar 0,00426%. Nilai efisiensi tersebut tergolong sangat rendah jika dibandingkan dengan berbagai penelitian sebelumnya. Menurut penelitian Calogero et al. (2010), DSSC yang menggunakan sensitizer alami berbasis antosianin mampu menghasilkan efisiensi hingga 0,56%. Sementara itu, Kumar et al. (2023) melaporkan bahwa DSSC berbasis TiO₂ dan *dye* alami menghasilkan efisiensi pada rentang 0,061–0,72%. Dibandingkan dengan hasil penelitian tersebut, efisiensi yang diperoleh pada penelitian ini jauh lebih rendah, sehingga menunjukkan bahwa proses konversi energi cahaya menjadi energi listrik belum berlangsung secara optimal. Rendahnya efisiensi DSSC pada penelitian ini diduga berkaitan dengan tingginya nilai *band gap* TiO₂ yang diperoleh, yaitu sebesar 4,1 eV. Menurut Hashim et al. (2012), TiO₂ anatase umumnya memiliki *band gap* sekitar 3,2 eV yang memungkinkan material menyerap radiasi ultraviolet dekat dan mendukung proses transfer elektron dari *dye* ke pita konduksi TiO₂. Ketika nilai *band gap* meningkat, kemampuan material dalam memanfaatkan spektrum cahaya menjadi semakin terbatas karena hanya foton dengan energi yang lebih tinggi yang dapat diserap. Akibatnya, jumlah elektron yang dihasilkan selama proses eksitasi menjadi berkurang sehingga arus fotolistrik yang dihasilkan juga menurun.

Nilai Voc sebesar 0,479 V menunjukkan bahwa proses pemisahan muatan masih dapat berlangsung dalam sistem DSSC yang digunakan. Nilai Voc pada DSSC ditentukan oleh perbedaan tingkat energi antara pita konduksi TiO₂ dan potensial redoks elektrolit. Nilai Voc yang diperoleh pada penelitian ini masih berada dalam rentang umum DSSC berbasis TiO₂, yaitu sekitar 0,4–0,8 V. Oleh karena itu, rendahnya efisiensi perangkat lebih banyak disebabkan oleh rendahnya arus yang dihasilkan dibandingkan oleh tegangan keluarannya (O'Regan dan Gratzel, 1991). Hal tersebut diperkuat oleh nilai Isc yang hanya sebesar 0,02 mA. Menurut Maheswari et al. (2020), arus hubung singkat pada DSSC sangat dipengaruhi oleh luas permukaan TiO₂, jumlah *dye* yang teradsorpsi, kemampuan transport elektron, serta laju rekombinasi muatan. Nilai Isc yang rendah menunjukkan bahwa jumlah elektron yang berhasil diinjeksi dari *dye* ke pita konduksi TiO₂

masih sangat terbatas. Kondisi ini dapat disebabkan oleh rendahnya kemampuan adsorpsi *dye* maupun tingginya laju rekombinasi elektron pada antarmuka TiO_2 -*dye*-elektrolit.

Selain itu, menurut Mathew et al. (2014), peningkatan performa DSSC sangat bergantung pada kemampuan fotoanoda dalam memanen cahaya tampak dan meminimalkan rekombinasi elektron. Oleh karena itu, nilai *band gap* TiO_2 sebesar 4,1 eV pada penelitian ini diduga menjadi salah satu faktor utama yang menyebabkan rendahnya nilai *I_{sc}* dan efisiensi DSSC. Semakin besar *band gap* material, semakin sedikit spektrum cahaya yang dapat dimanfaatkan sehingga jumlah elektron yang berkontribusi terhadap arus listrik menjadi berkurang.

IV. PENUTUP

A. Simpulan

Berdasarkan berbagai penelitian terdahulu, dapat diketahui bahwa sintesis nanopartikel TiO_2 melalui pendekatan green synthesis telah berhasil dilakukan dengan memanfaatkan ekstrak tumbuhan sebagai agen pereduksi alami. Proses sintesis berbasis biomaterial ini terbukti mendukung pembentukan struktur TiO_2 yang stabil dan berkarakteristik semikonduktor, serta mencerminkan potensi penggunaan limbah organik sebagai sumber alternatif dalam pengembangan material fungsional. Karakterisasi yang dilakukan menegaskan bahwa pendekatan sintesis hijau dapat menginisiasi pembentukan gugus fungsi Ti-O sekaligus mengurangi residu organik dari proses awal. Karakteristik fotoanoda TiO_2 memiliki pengaruh yang signifikan terhadap performa DSSC. Nilai *band gap* yang tinggi diduga menjadi faktor utama yang membatasi proses penyerapan cahaya dan transfer muatan dalam sistem. Oleh karena itu, diperlukan optimasi lebih lanjut terhadap metode sintesis dan karakteristik struktur TiO_2 untuk memperoleh nilai *band gap* yang lebih mendekati TiO_2 anatase standar, meningkatkan adsorpsi *dye*, serta menekan rekombinasi elektron sehingga performa DSSC dapat ditingkatkan. Selain itu, aplikasi material hasil sintesis pada perangkat DSSC memperlihatkan bahwa ekstrak kulit jeruk mampu berperan sebagai komponen pendukung dalam meningkatkan kemampuan interaksi material dengan cahaya, meskipun masih diperlukan pengembangan lebih lanjut untuk memperoleh performa yang lebih optimal.

DAFTAR PUSTAKA

- Afif, F., & Martin, A. 2022. Tinjauan potensi Dan kebijakan energi surya di Indonesia Engine: Energi, Manufaktur, dan Material, 6(1), 43-52. <https://doi.org/10.30588/jeemm.v6i1.99>
- Assalam, I. F., Muhammad, U., & Irvawansyah, I. 2024. Evaluasi Degradasi dan Performa Panel Surya Multikristal di Kondisi Tropis dengan Translasi IEC 60891. Joule (Journal of Electrical Engineering, 5(1), 28-35
- Bayu, H., and Windarta, J., 2021. Tinjauan Kebijakan dan Regulasi Pengembangan PLTS di Indonesia. Jurnal Energi Baru dan Terbarukan [Online] Volume 2(3), pp. 123-132.
- Calogero, Giuseppe., et al. (2020). *Efficient dye-sensitized solar cells using red turnip and purple wild Sicilian prickly pear fruits*. International Journal of Molecular Sciences, 11(1), 254–267.
- Kadang, J. M., and Windarta, J., 2021. Optimasi Sosial-Ekonomi pada Pemanfaatan PLTS PV untuk EnergiBerkelanjutan di Indonesia. Jurnal Energi Baru dan terbarukan, [Online] Volume 2(2), pp. 74-83. <https://doi.org/10.14710/jebt.2021.11113>
- Karim, N.A., Mehmood, U., Zahid, H.F., Asif, T., 2019a. Nanostructured photoanode and counter electrodematerials for efficient Dye-Sensitized Solar Cells (DSSCs). Solar Energy 185, 165–188. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.04.057>
- Keshavarz, R., Rahman, M. Y. A., & Basirun, W. J. (2015). Performance enhancement of dye-sensitized solar cells based on TiO_2 thick mesoporous photoanodes by morphological manipulation. *Nanoscale Research Letters*, 10(1), 1–10.
- Kumar, A., et al. (2023). *Nanoengineering TiO_2 for evaluating performance in DSSC with natural dye*. RSC Advances, 13, 21961–21976.

- Hani, U., Kidwan, F. N., & Albarqi, L. A. (2024). Biogenic silver nanopartikel synthesis using orange peel Extract and its multifaceted biomedical application. *Biotechnology and Applied Biochemistry*.
- Hashim, N., et al. (2012). *Recent progress in dye sensitized solar cells: Photosensitizers, electrolytes and photoanodes*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(8), 5916–5932.
- Maheswari, P., et al. (2020). *Effect of TiO_2 particle and pore size on DSSC efficiency*. *Emergent Materials*, 3, 1121–1131.
- Mathew, S., et al. (2014). *Dye-sensitized solar cells with 13% efficiency achieved through molecular engineering of porphyrin sensitizers*. *Nature Chemistry*, 6, 242–247.
- Maiaugree, W., Lowpa, S., Towannang, M., Rutphonsan, P., Tangtrakarn, A., Pimanpang, S., Maiaugree, P., Ratchapolthavisin, N., Sang-aroon, W., Jarernboon, W., Amornkitbamrung, V., 2015. A dye sensitized solar cell using natural counter electrode and natural dye derived from mangosteen peel waste. *Sci Rep* 5, 15230. <https://doi.org/10.1038/srep15230>
- Madani, K., et al. (2020). *Comparison of passivation properties of plasma-assisted ALD and APCVD deposited Al_2O_3 with SiN_x capping*. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 218, 110718.
- Mustaghfiri, M. A., & Munasir. (2023). *Green synthesis of TiO_2 nanoparticles: dye-sensitized solar cells (DSSC) Applications: a review*. *Inovasi Fisika Indonesia*, 12(2), 10–29. <https://doi.org/10.26740/ifi.v12n2.p10-29>
- O'Regan, Brian & Grätzel, Michael (1991). *A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO_2 films*. *Nature*, 353, 737–740.
- Prayitno, B., Musyarofah, Fauziyah, N, A., Nuraini, Y., Puspitasari, N., 2023. Extraction and Optical Study of Natural Dyes for Dye-Sensitized Solar Cell Application. *SPECTA Journal of Technology* Vol 7, No 2, pg: 533-540
- Putri, N. P., Riska, A. M., Kusumawati, D. H., & Suaebah E. 2024. Enhanced Photocatalytic Degradation of Congo Red Dye Using Green-Synthesized TiO_2 and PANI/ TiO_2 with Papaya Leaf as Bio-Reduction. *RESEARCH ARTICLE*.
- Rosaline, M. A., Rakkini, A. M., Wadaan, M. A., Joice, A. I., Rani, A. G., Kalimuthu, R., Ganesan, S., Devanesan, S., & Yang, H.-H. (2025). Green synthesized TiO_2 nanoparticles from herbal extracts for photocatalytic dye degradation: Mechanistic insights into nano-geochemical interfaces. *Environmental Geochemistry and Health*. <https://doi.org/10.1007/s10653-025-02926-7>
- Srinivasan, M., Venkatesan, M., Arumugam, V., Natesan, G., Saravanan, N., Murugesan, S., Ramachandran, S., Ayyasamy, R., Pugazhendhi, A., 2019. Green synthesis and characterization of titanium dioxide nanoparticles (TiO_2 NPs) using *Sesbania grandiflora* and evaluation of toxicity in zebrafish embryos. *Process Biochemistry* 80, 197–202. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2019.02.010>
- Yuliarto, B., & Wardhana, S. 2020. Green synthesis of TiO_2 nanoparticles using *Citrus sinensis* peel extract For DSSC. *Materials Today: Proceedings*, 44, 2880-2884.