

BAB I

PENDAHULUAN

Energi surya telah menjadi fokus utama dalam pengembangan teknologi energi terbarukan karena ketersediaannya yang melimpah dan sifatnya yang ramah lingkungan. Sel surya berbasis silikon hingga kini masih mendominasi pasar dengan capaian efisiensi konversi daya yang tinggi, namun keterbatasan berupa biaya produksi yang besar, rigiditas material, serta dampak lingkungan pada proses fabrikasinya, mendorong munculnya penelitian terhadap alternatif generasi ketiga. Salah satu kandidat potensial adalah *Dye-Sensitized Solar Cell* (DSSC), yang menawarkan biaya produksi relatif rendah, fleksibilitas, serta kemungkinan untuk diaplikasikan dalam bentuk sel surya semitransparan. Meskipun demikian, kendala utama pada DSSC semitransparan adalah bagaimana menyeimbangkan antara efisiensi konversi daya (PCE) dan tingkat transparansi optik (AVT), sehingga diperlukan strategi optimasi fotoelektroda TiO₂ dan pemilihan dye yang tepat.

1.1 Latar belakang

Konsumsi energi di Indonesia terus meningkat seiring bertambahnya populasi. Pada tahun 2018, Total Produksi Energi Primer (TPEP) mencapai 411,6 MTOE, dengan 64% diekspor dalam bentuk batu bara dan LNG, sementara Indonesia masih mengimpor minyak mentah sebesar 43,2 MTOE untuk kebutuhan dalam negeri. Sektor transportasi menjadi pengguna energi terbesar (40%), diikuti oleh industri (36%), rumah tangga (16%), komersial (6%), dan sektor lain (2%). Data ini menunjukkan perlunya strategi pengelolaan energi yang lebih efisien dan berkelanjutan untuk memenuhi kebutuhan nasional (Di dkk., 2020). Pemerintah Indonesia terus menunjukkan komitmen yang kuat dalam pengembangan energi terbarukan. Hingga Semester I (Januari - Juni) tahun 2024, penambahan kapasitas terpasang Pembangkit Listrik Tenaga (PLT) Energi Baru dan Terbarukan (EBT) telah mencapai 217,73 Mega Watt (MW) atau sekitar 66,6% dari target tahunan sebesar 326,91 MW (Kementerian Energi dan Sumber Daya mineral, 2024). Selain itu, potensi energi surya di Indonesia sangat besar, mencapai lebih dari 3.200

gigawatt (GW), meskipun saat ini pemanfaatannya baru sekitar 200 megawatt (Kementrian Energi dan Sumber Daya mineral, 2024).

Saat ini rasio desa berlistrik dari PLN mencapai 90,78%, namun masih terdapat lebih dari 4.700 desa yang belum menikmati listrik PLN. Beberapa provinsi, seperti Kalimantan Barat, Kalimantan Utara, Kalimantan Timur, Kalimantan Tengah, dan Maluku, memiliki rasio elektrifikasi di bawah 80%, sementara Papua dan Papua Barat masih di bawah 50% karena lokasi yang sulit dijangkau dan sekitar lebih dari 4.700 desa yang belum menikmati Listrik (Verda Nano Setiawan, 2022) . Pada tahun 2023, rasio elektrifikasi di Indonesia meningkat dari 99,67% pada 2022 menjadi 99,78%, sementara rasio desa berlistrik mencapai 99,83%. Dari total rumah tangga yang terlistriki, 98,32% menggunakan listrik dari PLN, dan 1,46% menggunakan listrik non-PLN. Pemerintah menargetkan pada 2024 seluruh rumah tangga di Indonesia dapat menikmati listrik dengan rasio elektrifikasi dan rasio desa berlistrik mencapai 100% (Kementrian Energi dan Sumber Daya Mineral, 2024a).

Potensi sumber daya dan cadangan mineral dan batubara (minerba) di Indonesia masih besar, dengan besi, emas primer, dan tembaga sebagai komoditas utama. Berdasarkan data Badan Geologi per Desember 2018, tembaga memiliki potensi terbesar sebesar 12.468,35 juta ton bijih, diikuti oleh besi (12.079,45 juta ton), emas primer (11.402,33 juta ton), dan nikel (9.311,06 juta ton). Sumber daya lainnya meliputi perak (6.433,01 juta ton), bauksit (3.301,33 juta ton), timah (3.878,29 juta ton), dan emas alluvial (1.619,84 juta ton). Hal ini menunjukkan bahwa Indonesia memiliki cadangan minerba yang signifikan untuk dimanfaatkan ke depan (Kementrian Energi dan Sumber Daya Mineral, 2020) Pada tahun 2023, bauran energi Indonesia masih didominasi oleh batubara dengan persentase 40,46%, meskipun mengalami penurunan dari tahun sebelumnya (42,38%). Minyak bumi menyumbang 30,18%, gas bumi 16,28%, dan energi baru terbarukan (EBT) 13,09%. Meskipun EBT mengalami kenaikan 0,79% dibanding tahun sebelumnya, realisasinya masih di bawah target yang ditetapkan sebesar 17,87% (Kementrian Energi dan Sumber Daya Mineral, 2024b).

Muhammad Nur Al Araf, 2025

OPTIMASI KARAKTERISTIK FOTOELEKTRODA TiO_2 PADA SYE SENSITIZED SOLAR CELL UNTUK APLIKASI SELL SURYA TRANSPARAN

Universitas Pendidikan Indonesia | repository.upi.edu | perpustakaan.upi.edu

Rencana Pembangunan Jangka Panjang Nasional (RPJPN) 2025–2045 menekankan pentingnya transisi energi menuju sumber yang lebih bersih dan berkelanjutan, termasuk pemanfaatan energi surya. Pemerintah Indonesia berencana membangun 75 gigawatt (GW) energi terbarukan dalam 15 tahun ke depan, yang mencakup energi surya, hidro, panas bumi, dan nuklir, sebagai bagian dari komitmen mencapai netralitas karbon pada tahun 2060 (Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, 2024a).

Tren harga listrik per kWh di Indonesia mengalami perubahan seiring waktu, dipengaruhi oleh kebijakan pemerintah dan biaya produksi. Pada 2019, tarif rata-rata tercatat Rp 1.130 per kWh, kemudian turun menjadi Rp 1.444,70 per kWh untuk pelanggan tegangan rendah pada 2020. Pada Januari–Maret 2024, tarif listrik bersubsidi untuk daya 450 VA sebesar Rp 415 per kWh, sementara daya 900 VA sebesar Rp 605 per kWh. Pada Januari 2025, tarif untuk rumah tangga daya 1.300–2.200 VA ditetapkan Rp 1.444,70 per kWh dan daya 3.500 VA ke atas Rp 1.699,53 per kWh. Perubahan tarif ini mencerminkan penyesuaian terhadap kondisi ekonomi dan keberlanjutan penyediaan listrik nasional (Setiawan, 2025).

Perhatian yang mendesak terhadap permasalahan energi dan lingkungan di abad ke-21 menjadi semakin krusial, terutama akibat dampak pemanasan global yang disebabkan oleh konsumsi energi yang berlebihan. Seiring dengan meningkatnya populasi dan aktivitas industri, kebutuhan energi global mengalami lonjakan yang signifikan, yang pada awalnya masih sangat bergantung pada bahan bakar fosil. Namun, karena sumber daya ini semakin berkurang, fokus kini beralih ke energi bersih dan terbarukan, seperti tenaga surya. Selain itu, kemajuan dalam teknologi sel surya, baterai, dan sel bahan bakar diharapkan dapat mengatasi tantangan energi dan lingkungan dengan memanfaatkan potensi nanomaterial guna meningkatkan efisiensi sistem energi serta mengurangi pencemaran (*Environmental Chemistry: Green Chemistry and Pollutants in Ecosystems*, 2019a). Sel surya adalah piranti semikonduktor yang mengubah energi cahaya menjadi energi listrik.

Sejak diperkenalkannya sel surya berbasis silikon (Si) pada tahun 1954, teknologi sel surya telah mengalami berbagai perubahan, baik dari segi struktur maupun material yang digunakan. Perkembangannya dibagi menjadi tiga generasi utama: (1) generasi pertama, yaitu sel surya berbasis silikon, yang hingga kini masih menjadi jenis paling umum digunakan; (2) generasi kedua, yakni sel surya dengan teknologi film tipis, yang pertama kali menggunakan material copper sulfide/cadmium-sulfide junction; dan (3) generasi ketiga, yang menggunakan material semikonduktor. Salah satu contoh dari generasi ketiga adalah dye-sensitized solar cell (DSSC), yang pertama kali dikembangkan oleh Michael Grätzel pada tahun 1991 (Shah dkk., 2023)

DSSC memiliki berbagai keunggulan dibandingkan sel surya berbasis silikon, termasuk biaya produksi yang lebih rendah, karena proses fabrikasinya sederhana dan tidak memerlukan teknologi tinggi. Selain itu, DSSC memiliki fleksibilitas dan transparansi, DSSC juga lebih efisien dalam kondisi cahaya rendah, memungkinkan penggunaan yang optimal dalam ruangan atau cahaya tidak langsung. Keunggulan lainnya adalah kemampuannya untuk menggunakan berbagai jenis pewarna, termasuk pewarna organik dan logam kompleks seperti N719, guna memaksimalkan penyerapan energi matahari. Selain itu, proses produksinya lebih ramah lingkungan dibandingkan sel surya silikon, karena dapat menggunakan material non-toksik dan pewarna alami (Lin dkk., 2025)

Dye-Sensitized Solar Cells (DSSC) juga memiliki beberapa kelemahan yang membatasi efisiensi dan penerapannya. Ketergantungannya pada logam langka seperti rutenium meningkatkan biaya dan menghambat keberlanjutan dalam produksi skala besar (Satheesh dkk., 2025). Dan juga ada beberapa kelemahan seperti ketidakstabilan material, efisiensi injeksi elektron yang rendah, serta rekombinasi muatan yang cepat, yang menyebabkan penurunan efisiensi konversi energi (Ashrafuzzaman dkk., 2025).

Untuk memahami sumber kelemahan tersebut, perlu diketahui bahwa sel surya tersensitisasi pewarna (DSSC) terdiri dari beberapa komponen utama, yaitu kaca

konduktif, elektroda semikonduktor yang telah tersensitisasi oleh pewarna (fotoanoda), elektrolit, dan elektroda balik (Kang dkk., 2010). Proses penyerapan cahaya dalam DSSC dilakukan oleh lapisan monomolekuler pewarna yang teradsorpsi pada permukaan semikonduktor. Dalam konfigurasi DSSC konvensional, semikonduktor yang digunakan umumnya bertipe-n, di mana elektron dalam pita konduksi berperan dalam mekanisme konduktivitas listrik material tersebut (Murang' dkk., 2024). N719 adalah pewarna berbasis *rutenium* yang sering digunakan sebagai pewarna fotoanoda pada *Dye-Sensitized Solar Cells* (DSSC), dengan kemampuan menyerap cahaya secara efisien dan memfasilitasi injeksi elektron ke TiO_2 , sehingga meningkatkan konversi energi. Pewarna ini memiliki fleksibilitas dalam berbagai konsentrasi, dengan efisiensi tertinggi pada 1 mM. Namun, penggunaannya memiliki kelemahan, seperti biaya tinggi, masalah stabilitas, dan dampak lingkungan akibat kandungan logam berat. Meskipun demikian, N719 tetap menjadi pilihan utama dalam DSSC karena kinerjanya yang unggul dalam meningkatkan efisiensi sel surya (Hardani dkk., 2025),

Selain dari aspek pewarna, desain dan material komponen lain pada DSSC juga memegang peranan penting dalam menentukan kinerja perangkat. Selain itu, semikonduktor ini memiliki celah pita yang relatif lebar, sehingga kontribusinya terhadap absorpsi spektrum cahaya matahari tidak signifikan. DSSC umumnya dirancang dalam bentuk struktur sandwich, di mana fotoanoda dan elektroda lawan berbasis kaca konduktif disusun saling berhadapan dengan lapisan elektrolit tipis yang ditempatkan di antaranya (Sun dkk., 2024). Jarak antar elektroda biasanya ditentukan oleh bingkai termoplastik (Surlyn) yang juga berfungsi sebagai segel, dengan ketebalan sekitar 25 μm . Pengurangan jarak antar elektroda menjadi lebih kecil sangat diinginkan karena dapat mengoptimalkan difusi mediator redoks dalam elektrolit, sehingga menurunkan hambatan sistem dan meningkatkan efisiensi konversi energi. Material kaca konduktif yang paling umum digunakan dalam DSSC adalah kaca berlapis *fluorine-doped tin oxide* (FTO), karena memiliki keseimbangan optimal antara stabilitas kimia dan termal yang tinggi, resistansi lembaran yang rendah, serta kemampuan transmisi cahaya

Muhammad Nur Al Araf, 2025

OPTIMASI KARAKTERISTIK FOTOELEKTRODA TiO_2 PADA SYE SENSITIZED SOLAR CELL UNTUK APLIKASI SELL SURYA TRANSPARAN

Universitas Pendidikan Indonesia | repository.upi.edu | perpustakaan.upi.edu

matahari yang baik, sehingga mendukung performa keseluruhan perangkat . Sejauh ini, semikonduktor yang paling banyak digunakan dalam DSSC adalah TiO_2 dengan struktur kristal anatase, yang memiliki celah pita ~ 3.2 eV dan hanya mampu menyerap sinar UV (Muñoz-García dkk., 2021).

Selain itu, peran elektroda balik juga tidak kalah penting dalam menentukan performa akhir DSSC. Elektroda balik yang paling umum digunakan pada DSSC yaitu menggunakan lapisan Platina (Pt) (Prima dkk., 2024). Platinum (Pt) banyak dimanfaatkan sebagai elektroda balik dalam DSSC karena memiliki kemampuan elektrokatalitik yang unggul dalam proses reduksi I_3 serta konduktivitas listrik yang sangat tinggi (Song dkk., 2012) . Pt secara efektif memfasilitasi reaksi reduksi I_3^- menjadi I^- dalam elektrolit, yang merupakan proses penting dalam siklus regenerasi DSSC (Ahmad dkk., 2025).

Setelah membahas peran elektroda balik, penting juga untuk menyoroti komponen utama lainnya, yakni fotoelektroda, yang menjadi pusat proses penyerapan cahaya dalam DSSC. Fotoelektroda adalah komponen krusial dalam DSSC karena kemampuannya dalam menyerap cahaya, yang berkontribusi pada efisiensi dan konversi energi yang optimal. Struktur mesopori pada fotoanoda memiliki karakteristik unik yang mendukung kinerjanya dalam perangkat DSSC (Kumar et al., 2023). *Talitanium dioksida* (TiO_2) merupakan material yang paling umum digunakan sebagai fotoanoda dalam DSSC, dengan energi celah pita sekitar 3,2 eV. Nanopartikel TiO_2 sering dipilih oleh para peneliti karena menawarkan efisiensi konversi daya yang tinggi, bersifat tidak beracun, serta memiliki biaya produksi yang relatif rendah (Ramaripa dkk., 2023) . Selain itu, TiO_2 memiliki tingkat porositas yang tinggi serta rasio luas permukaan terhadap volume yang besar, sehingga dapat berinteraksi secara optimal dengan pewarna sensitisasi dan secara signifikan meningkatkan efisiensi konversi foton menjadi energi Listrik (Ma'arifah dkk., 2025a) . dalam penelitiannya menggunakan struktur $\text{TiO}_2/\text{Fluorine-doped tin oxide}$ (FTO)/Pt dan berhasil memperoleh efisiensi sebesar 1,31% (Musila dkk., 2018a).

Setelah memahami karakteristik dasar fotoelektroda TiO₂, penting untuk meninjau hasil penelitian terdahulu yang menjadi landasan pengembangan studi ini. Penelitian sebelumnya Mengenai pengenalan lapisan kompak TiO₂ dalam sel surya peka-pewarna (DSSC) secara signifikan meningkatkan kinerja dan efisiensi sel, dengan peningkatan efisiensi hingga 145% (dari 1,31% menjadi 3,21%), disertai peningkatan arus hubung singkat dan tegangan sirkuit terbuka (Musila dkk., 2018b) Oleh karena itu penelitian dilanjutkan untuk mengeksplorasi potensi variasi pada fotoanoda TiO₂ menjadi semitransparan dengan penggunaan beberapa tipe pasta komersil (18 NR-AO, 90T, 18 NRT) dilapisan foto anoda pada DSSC. Dengan begitu diharapkan dapat meningkatkan kinerja efisiensi pada DSSC.

Fokus penelitian ini adalah pada pengembangan dan optimasi *Dye-Sensitized Solar Cell* (DSSC) semitransparan, di mana performa tidak hanya diukur berdasarkan efisiensi konversi daya (*Power Conversion Efficiency* – PCE), tetapi juga mempertimbangkan tingkat transparansi optik dan kualitas visual perangkat. Pada sel surya transparan, parameter transparansi menjadi penting karena perangkat dirancang untuk memungkinkan cahaya melewati sebagian lapisan aktifnya, misalnya untuk aplikasi pada jendela pintar (*smart windows*) atau *building-integrated photovoltaics*. Oleh karena itu, dua parameter tambahan yang sering digunakan untuk mengevaluasi kinerja optik adalah *Average Visible Transmittance* (AVT) dan *Light Utilization Efficiency* (LUE) (Naim dkk., 2021)

Average Visible Transmittance (AVT) merepresentasikan persentase rata-rata cahaya tampak (dalam rentang panjang gelombang 380–780 nm) yang dapat melewati perangkat. Nilai AVT yang tinggi menunjukkan tingkat transparansi yang baik, sehingga perangkat lebih sesuai untuk aplikasi yang memerlukan transmisi cahaya visual yang nyaman bagi mata manusia (Naim dkk., 2021) . Namun, transparansi yang terlalu tinggi biasanya akan menurunkan penyerapan foton oleh lapisan pewarna, sehingga dapat mengurangi PCE. Oleh karena itu, desain DSSC transparan selalu melibatkan kompromi antara efisiensi konversi daya dan transparansi optik.

Light Utilization Efficiency (LUE) adalah parameter gabungan yang menghubungkan PCE dengan AVT, digunakan untuk mengevaluasi seberapa efektif perangkat memanfaatkan cahaya yang diserap untuk menghasilkan listrik sambil tetap mempertahankan transparansi. LUE biasanya dihitung dengan mengalikan nilai PCE dengan AVT, lalu dibagi 100, sehingga memberikan gambaran keseimbangan antara efisiensi dan estetika (Naim dkk., 2021; Roy dkk., 2021a). Parameter ini menjadi sangat relevan karena memungkinkan penilaian holistik: perangkat dengan PCE tinggi tetapi AVT rendah mungkin kurang menarik untuk aplikasi transparan, sementara perangkat dengan AVT tinggi tetapi PCE rendah juga tidak efisien secara fungsional.

Dengan demikian, penggunaan parameter PCE, AVT, dan LUE secara bersamaan memberikan gambaran yang lebih menyeluruh terhadap performa DSSC semitransparan. PCE menunjukkan kinerja konversi energi murni, AVT mengindikasikan tingkat transparansi yang sesuai untuk aplikasi visual, dan LUE menjadi indikator keseimbangan antara kedua aspek tersebut. Pendekatan ini memungkinkan analisis yang lebih tepat sasaran dalam merancang DSSC transparan yang tidak hanya efisien secara energi, tetapi juga memiliki kualitas visual yang baik untuk integrasi arsitektural (Roy dkk., 2021b)

penelitian ini berfokus pada optimasi karakteristik fotoelektroda TiO_2 untuk Dye-Sensitized Solar Cell (DSSC) semitransparan, dengan mengutamakan evaluasi tiga parameter utama, yaitu *Power Conversion Efficiency* (PCE), *Average Visible Transmittance* (AVT), dan *Light Utilization Efficiency* (LUE). Pendekatan ini bertujuan untuk mencapai keseimbangan optimal antara efisiensi konversi daya dan tingkat transparansi, sehingga perangkat tidak hanya memiliki kinerja listrik yang tinggi, tetapi juga memenuhi kebutuhan estetika dan fungsional untuk aplikasi seperti jendela fotovoltaik. Dengan menggabungkan analisis aspek kelistrikan dan optik secara menyeluruh, diharapkan penelitian ini dapat memberikan kontribusi signifikan terhadap pengembangan teknologi sel surya transparan yang efisien, ramah lingkungan, dan berkelanjutan.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan, beberapa permasalahan yang dapat dirumuskan dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana pengaruh optimasi pasta TiO_2 terhadap karakteristik fotoelektroda dan kinerja *Dye Sensitized Solar Cell* semitransparan?
2. Bagaimana pengaruh kombinasi *organik dye* terhadap kinerja *Dye sensitized solar cell* semitransparan?

1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk:

1. Mendapatkan Gambaran tentang pengaruh optimasi pasta TiO_2 terhadap karakteristik fotoelektroda dan kinerja *Dye Sensitized Solar Cell* semitransparan
2. Mendapatkan Gambaran tentang pengaruh kombinasi *organik dye* terhadap kinerja *Dye sensitized solar cell* semitransparan

1.4 Batasan masalah

Berdasarkan latar belakang, rumusan masalah, dan tujuan penelitian, ruang lingkup penelitian ini difokuskan pada optimasi karakteristik fotoelektroda TiO_2 dalam *Dye Sensitized Solar Cell* (DSSC) tipe semi-transparan. Optimasi yang dilakukan mencakup analisis morfologi, ketebalan lapisan, dan ukuran partikel TiO_2 untuk mengetahui pengaruhnya terhadap efisiensi dan tingkat transparansi sel surya. Sifat optik sel surya dianalisis melalui perhitungan *Average Visible Transmittance* (AVT) sebagai indikator utama transparansi.

sementara kinerja listrik dievaluasi melalui parameter tegangan *Open-Circuit* (V_{oc}), Densitas Arus *Short-Circuit* (J_{sc}), *Fill Factor* (FF), dan efisiensi konversi daya (PCE). Penelitian ini juga membahas pengaruh penggunaan kombinasi dye organik terhadap performa DSSC, dengan analisis spektrum absorbansi untuk melihat karakteristik penyerapan cahaya dari *dye* yang digunakan.

Muhammad Nur Al Araf, 2025

OPTIMASI KARAKTERISTIK FOTOELEKTRODA TiO_2 PADA SYE SENSITIZED SOLAR CELL UNTUK APLIKASI SELL SURYA TRANSPARAN

Universitas Pendidikan Indonesia | repository.upi.edu | perpustakaan.upi.edu

Keseimbangan antara transparansi dan efisiensi dievaluasi menggunakan parameter *Light Utilization Efficiency* (LUE), yang merupakan gabungan dari nilai efisiensi konversi daya (PCE) dan *Average Visible Transmittance* (AVT).

1.5 Manfaat Penelitian

Dengan adanya penelitian ini, diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan ilmu pengetahuan di bidang energi terbarukan, khususnya pada pengembangan *Dye Sensitized Solar Cell* (DSSC) semi-transparan. Penelitian ini memberikan informasi mengenai optimasi karakteristik fotoelektroda TiO_2 serta penggunaan kombinasi *dye* organik sebagai fotosensitizer, yang berpengaruh terhadap keseimbangan antara efisiensi konversi daya dan tingkat transparansi sel surya. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi atau kajian pustaka bagi penelitian selanjutnya, khususnya dalam topik pengembangan sel surya transparan. Selain itu, penelitian ini juga diharapkan dapat menjadi salah satu alternatif solusi dalam menjawab tantangan efisiensi dan estetika pada penerapan sel surya, seperti dalam aplikasi bangunan berkonsep ramah lingkungan (*green building*).