# BAB I
# PENDAHULUAN

## 1.1 Latar Belakang

Kebutuhan energi global yang terus meningkat secara eksponensial serta keterbatasan cadangan sumber energi fosil yang semakin menipis mendorong berbagai negara di seluruh dunia untuk mengembangkan teknologi energi terbarukan yang berkelanjutan, efisien, dan ramah lingkungan. Konsumsi energi dunia diproyeksikan meningkat sekitar 50% pada tahun 2050 dibandingkan kondisi saat ini, sementara ketergantungan terhadap bahan bakar fosil—yang menyumbang lebih dari 80% pasokan energi primer global—terus menimbulkan dampak perubahan iklim yang tidak dapat dihindari akibat emisi gas rumah kaca (International Energy Agency, 2023). Dalam konteks ini, energi surya fotovoltaik menjadi salah satu solusi paling strategis mengingat potensi sumber matahari yang mencapai 86.000 TW, jauh melampaui kebutuhan energi global saat ini sebesar sekitar 18 TW (Machín & Márquez, 2024).

Perkembangan teknologi sel surya telah melewati beberapa generasi penting. Generasi pertama berbasis silikon monokristalin dan polikristalin telah mencapai efisiensi komersial lebih dari 20%, namun terkendala oleh biaya produksi yang tinggi, keterbatasan bahan baku silikon murni, dan proses manufaktur yang padat energi serta memerlukan suhu fabrikasi hingga 1400°C. Generasi kedua berbasis *thin-film* seperti CdTe dan CIGS menawarkan biaya lebih rendah tetapi masih mengandung unsur-unsur toksik dan langka yang tidak ramah lingkungan. Generasi ketiga yang mencakup sel surya organik, *perovskite*, dan *Dye-sensitized solar cell* (DSSC) muncul sebagai alternatif yang lebih fleksibel, ramah lingkungan, dan berbiaya rendah (Machín & Márquez, 2024).

*Dye-sensitized solar cell* (DSSC) pertama kali dikembangkan secara efisien oleh O'Regan dan Grätzel pada tahun 1991 dan sejak saat itu menjadi salah satu topik penelitian sel surya yang paling aktif di dunia dengan ratusan publikasi ilmiah setiap tahunnya. DSSC menawarkan sejumlah keunggulan strategis dibandingkan teknologi sel surya konvensional, antara lain: proses fabrikasi

sederhana pada suhu rendah (< 150°C), penggunaan material yang relatif murah dan tidak toksik, kemampuan beroperasi secara efisien pada kondisi cahaya difus dan intensitas rendah (seperti di dalam ruangan), serta fleksibilitas desain dan warna perangkat yang memungkinkan integrasi arsitektur bangunan (Boschloo & Hagfeldt, 2009). Efisiensi DSSC terbaik yang dilaporkan hingga saat ini mencapai 14,3% menggunakan *dye* organik pada sel area kecil, dan diproyeksikan akan terus meningkat seiring perkembangan rekayasa material komponen selnya (Machín & Márquez, 2024).

Komponen utama DSSC terdiri dari fotoanoda berbasis semikonduktor oksida logam, molekul *dye sensitizer*, elektrolit redoks, dan *counter electrode* katalitik. Di antara semua komponen tersebut, fotoanoda merupakan elemen paling kritis yang menentukan efisiensi keseluruhan sel. Material titanium dioksida ($TiO_2$) dalam fase anatase telah menjadi pilihan utama sebagai material fotoanoda karena memiliki kombinasi sifat yang sangat sesuai: stabilitas kimia dan termal tinggi, biokompatibilitas dan non-toksisitas, *band gap* yang sesuai (~3,2 eV), serta mobilitas elektron yang relatif baik untuk semikonduktor oksida logam (Dubey et al., 2021). $TiO_2$ anatase memiliki parameter kisi a = 3,785 Å dan c = 9,514 Å dengan struktur oktahedral $TiO_6$ yang memberikan luas permukaan spesifik tinggi dan banyak situs aktif untuk adsorpsi molekul *dye*.

Namun, $TiO_2$ memiliki keterbatasan fundamental berupa nilai *band gap* yang relatif besar (~3,2 eV) sehingga hanya mampu mengabsorbsi sekitar 4–5% spektrum radiasi matahari yang jatuh pada *region ultraviolet*. Selain itu, nanopartikel $TiO_2$ yang disintesis secara konvensional cenderung beraglomerasi membentuk kluster berukuran besar, yang mengurangi luas permukaan efektif dan menurunkan kapasitas adsorpsi *dye*. Rekombinasi elektron yang berlangsung di batas butir antar partikel $TiO_2$ juga menjadi faktor pembatas efisiensi DSSC yang signifikan. Oleh karena itu, diperlukan strategi modifikasi atau rekayasa material $TiO_2$ yang mampu mengatasi keterbatasan-keterbatasan tersebut (Dubey et al., 2021; Pimsawat et al., 2024).

*Cellulose nanocrystal* (CNC) merupakan turunan selulosa berstruktur nano yang semakin mendapat perhatian besar sebagai material aditif multifungsi dalam

sistem nanokomposit organik–anorganik. CNC diperoleh melalui hidrolisis asam terkontrol dari sumber selulosa kristalin yang menghasilkan partikel nano berbentuk batang (rod-like) dengan dimensi tipikal lebar 5–20 nm dan panjang 100–500 nm. CNC memiliki kombinasi sifat yang sangat unggul: kristalinitas tinggi (65–85%), luas permukaan spesifik yang sangat besar (150–250 $m^2/g$), sifat mekanik luar biasa (modulus Young ~150 GPa), dan stabilitas koloid yang baik berkat gugus sulfat bermuatan negatif pada permukaannya (Sun et al., 2024). Dalam sistem komposit dengan $TiO_2$, CNC berperan sebagai: (1) template bio-organik yang mengarahkan nukleasi dan pertumbuhan kristal $TiO_2$ pada permukaan CNC; (2) *stabilizer* sterik yang mencegah aglomerasi partikel $TiO_2$; (3) *pore-former* yang meninggalkan struktur berpori setelah kalsinasi; dan (4) jembatan konduksi elektron melalui ikatan *kovalent* Ti–O–C yang terbentuk di antarmuka organik–anorganik (Pimsawat et al., 2024; Cazan et al., 2021).

Indonesia merupakan produsen kelapa sawit terbesar di dunia yang menghasilkan limbah tandan kosong kelapa sawit (TKKS) dalam jumlah sangat besar, diperkirakan mencapai 40–45 juta ton per tahun (KLHK, 2024). TKKS merupakan sumber selulosa lignoselulosa yang kaya dengan kandungan selulosa 35–50%, hemiselulosa 25–35%, dan lignin 20–30%. Sebagian besar TKKS masih dibuang atau dibakar, menyebabkan permasalahan lingkungan serius berupa polusi udara dan pencemaran tanah. Pemanfaatan TKKS sebagai sumber CNC untuk aplikasi material energi merupakan pendekatan yang sangat strategis dalam kerangka ekonomi sirkular, mendukung agenda *green technology* nasional, dan berkontribusi pada pengurangan emisi karbon sesuai komitmen Indonesia dalam Perjanjian Paris (Wibowo et al., 2022; KLHK, 2024).

Beberapa penelitian terdahulu telah mengkaji komposit $TiO_2$–selulosa untuk berbagai aplikasi fotokatalisis dan menunjukkan hasil yang menjanjikan. Pimsawat et al. (2024) melaporkan bahwa komposit $TiO_2$/selulosa yang dirancang dengan cermat menunjukkan aktivitas fotokatalitik yang lebih tinggi dibandingkan $TiO_2$ murni, dengan peningkatan degradasi polutan organik hingga 40–60%. Cazan et al. (2021) membuktikan bahwa pengisian $TiO_2$ ke dalam matriks polimer meningkatkan sifat mekanik dan stabilitas termal komposit secara signifikan.

Mîndroiu et al. (2023) mendemonstrasikan bahwa penggunaan dispersan organik dalam pembuatan film tipis $TiO_2$ pada substrat FTO berpengaruh nyata terhadap sifat optik dan elektrokimia lapisan fotoanoda. Namun, aplikasi spesifik nanokomposit CNC–$TiO_2$ dari biomassa TKKS sebagai fotoanoda DSSC dengan variasi konsentrasi yang sistematis masih sangat terbatas dalam literatur ilmiah yang tersedia.

Selain material fotoanoda, penggunaan *dye sensitizer* alami berbasis antosianin dari buah naga merah (Hylocereus polyrhizus) menjadi komponen penting yang mendukung konsep green DSSC. Antosianin/betasianin dari buah naga memiliki gugus karboksil dan hidroksil yang memungkinkan interaksi kuat dengan permukaan $TiO_2$ melalui koordinasi, serta kemampuan penyerapan cahaya tampak yang baik pada rentang 500–560 nm. Putra et al. (2023) telah mendemonstrasikan kelayakan dasar penggunaan *dye* buah naga dalam DSSC, meskipun dengan $TiO_2$ murni tanpa modifikasi. Penggunaan *dye* alami ini tidak hanya ramah lingkungan tetapi juga mendukung pengurangan ketergantungan pada logam ruthenium yang mahal dan strategis dalam *dye* sintetis konvensional (Kim et al., 2021).

Berdasarkan analisis mendalam terhadap penelitian-penelitian terdahulu di atas, teridentifikasi bahwa terdapat celah pengetahuan (research gap) yang signifikan terkait: (1) penggunaan CNC dari TKKS sebagai dopan fungsional dalam $TiO_2$ untuk aplikasi DSSC secara spesifik; (2) pengaruh variasi konsentrasi CNC secara sistematis terhadap karakteristik struktural, morfologi, optik, dan kinerja DSSC dari nanokomposit CNC–$TiO_2$; serta (3) integrasi komprehensif seluruh komponen ramah lingkungan dalam satu perangkat DSSC. Penelitian ini hadir untuk mengisi celah tersebut dengan mengembangkan dan mengkarakterisasi secara menyeluruh nanokomposit CNC–$TiO_2$ berbasis TKKS dengan variasi konsentrasi 1%, 3%, dan 5% sebagai fotoanoda DSSC dengan *dye* antosianin buah naga, *counter electrode graphite*, dan elektrolit $KI/I_3^-$ (Tsotetsi et al., 2022; Mîndroiu et al., 2023).

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang di atas, rumusan masalah penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana karakteristik struktur dan morfologi nanokomposit CNC–$TiO_2$ dari TKKS yang disintesis dengan variasi konsentrasi CNC 1%, 3%, dan 5%?
2. Bagaimana pengaruh variasi konsentrasi CNC terhadap sifat optik (*band gap*, transmitansi) dan karakteristik gugus fungsi kimia nanokomposit CNC–$TiO_2$?
3. Bagaimana pengaruh variasi konsentrasi CNC terhadap morfologi lapisan fotoanoda, termasuk porositas, ketebalan, dan homogenitas distribusi partikel?
4. Bagaimana kinerja perangkat DSSC berbasis nanokomposit CNC–$TiO_2$ dari TKKS yang dievaluasi melalui parameter Voc, Isc, fill factor, dan efisiensi konversi energi?
5. Berapakah konsentrasi CNC optimal yang menghasilkan kinerja DSSC terbaik dan bagaimana mekanisme ilmiah di balik peningkatan kinerja tersebut?

## 1.3 Tujuan Penelitian atau Perancangan

Tujuan penelitian ini adalah:

1. Mensintesis dan mengkarakterisasi nanokomposit CNC–$TiO_2$ dari tandan kosong kelapa sawit (TKKS) menggunakan metode sol-gel in-situ dengan variasi konsentrasi CNC 1%, 3%, dan 5%.
2. Menganalisis pengaruh variasi konsentrasi CNC terhadap struktur kristal (XRD), gugus fungsi kimia (FTIR), morfologi permukaan (SEM), dan sifat optik (*band gap*) nanokomposit.
3. Memfabrikasi perangkat DSSC lengkap menggunakan dye antosianin buah naga merah, elektrolit $KI/I_3^-$, dan *counter electrode graphite*.
4. Mengevaluasi kinerja DSSC melalui pengukuran kurva J–V untuk memperoleh Voc, Isc, *fill factor*, dan efisiensi konversi energi dari masing-

masing variasi komposisi.

5. Menentukan konsentrasi CNC optimal dan menjelaskan mekanisme pengaruhnya terhadap kinerja DSSC melalui korelasi antara struktur material dan performa fotovoltaik.

## 1.4 Manfaat Penelitian atau Perancangan

Manfaat penelitian ini meliputi:

**Manfaat Ilmiah**

1. Memberikan kontribusi ilmiah berupa data karakterisasi komprehensif nanokomposit CNC–$TiO_2$ dari TKKS.
2. Pemahaman mendalam tentang hubungan komposisi–struktur–sifat–kinerja material, serta landasan ilmiah bagi pengembangan material fotoanoda DSSC generasi berikutnya berbasis nanokomposit organik–anorganik dari biomassa lokal Indonesia (Bioplastics for Food Packaging, 2023).

## 1.5 Ruang Lingkup dan Batasan Perancangan/Perancangan

Agar penelitian terfokus dan dapat dilaksanakan dengan sumber daya yang tersedia, batasan penelitian yang diterapkan adalah:

1. Sumber biomassa yang digunakan adalah tandan kosong kelapa sawit (TKKS) dari pabrik kelapa sawit di wilayah Aceh Utara, Indonesia.
2. CNC diekstraksi melalui tahapan *bleaching* (NaOCl 5%), delignifikasi alkali (NaOH 17,5%), dan hidrolisis asam sulfat ($H_2SO_4$ 64% w/v, 45°C, 60 menit).
3. Nanokomposit CNC–$TiO_2$ disintesis menggunakan prekursor titanium(IV) isopropoksida (TTIP) melalui metode sol-gel in-situ pada suhu rendah (80°C).
4. Variasi konsentrasi CNC yang digunakan adalah 0% (kontrol/$TiO_2$ murni), 1%, 3%, dan 5% (b/b terhadap massa $TiO_2$).
5. *Dye sensitizer* menggunakan ekstrak antosianin/betasianin dari buah naga

merah (Hylocereus polyrhizus) dalam pelarut etanol 96%.

6. *Counter electrode* menggunakan *graphite* pada substrat kaca FTO.
7. Elektrolit menggunakan larutan KI 0,5 M dalam etilen glikol.
8. Evaluasi kinerja DSSC difokuskan pada pengukuran kurva J–V untuk memperoleh Voc, Isc, FF, dan efisiensi (η%) tanpa pengujian stabilitas jangka panjang.
9. Karakterisasi material mencakup XRD, FTIR, SEM, dan analisis Tauc plot dari data absorbansi UV-Vis.