

## **Green synthesis of TiO<sub>2</sub> nanoparticles: dye-sensitized solar cells (DSSC) Applications : a review**

<sup>1)</sup>Mochammad Anang Mustaghfiri, <sup>2)</sup>Munasir

<sup>1)</sup>Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: mochammad.18039@mhs.unesa.ac.id

<sup>2)</sup>Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: munasir\_physics@unesa.ac.id

### **Abstrak**

Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari teknik green synthesis nanopartikel, terkhusus untuk nanopartikel TiO<sub>2</sub>. Berbagai jenis tanaman bisa digunakan sebagai sumber senyawa ekstraksi (chaping agent, dan deionisasi logam Ti) pada proses sintesis nanopartikel TiO<sub>2</sub>; diantaranya: daun krokot (*Portulaca Oleracea* L.), *Pisonia grandis* (Leechai kottai keera), jagung (*zea mays*), Kesumba Keling (*bixa orellana*), Biji kesumba (*Bixa orellana* seed), Jeruk (*Citrus Limetta*), Klabet (*Trigonella foenum-graecum*), Daun Kelor (*Moringa Oleifera* Leaf), dan Turi (*Sesbania grandiflora*). Nanopartikel TiO<sub>2</sub> dapat diaplikasi sebagai dye-sensitized solar cells (DSSC). Ukuran nanopartikel TiO<sub>2</sub> yang disintesis dengan precursor TPID dan memanfaatkan berbagai ekstraksi tanaman telah menghasilkan ukuran 20-100 nm (spherical-like), dan ukuran kristal 9-13 nm (tetragonal crystalline). Sifat dasar dari nanopartikel TiO<sub>2</sub> dijelaskan dengan baik (struktur kristal, gugus fungsi dan ukuran partikel), selanjutnya sifat, struktur, dan mekanisme transportasi muatan DSSC- juga dijelaskan dengan rinci. Bagian yang penting pada struktur DSSC berbasis TiO<sub>2</sub> nanopartikel ini adalah fotoanoda, katalis dan elektrolit. DSSC dengan fotoanoda TiO<sub>2</sub> nanopartikel memiliki beberapa keunggulan, antara lain: efisiensi tinggi, biaya rendah, kestabilan tinggi, kinerja di bawah cahaya rendah, dan fleksibilitas desain. Hingga pengetahuan saya saat ini, efisiensi DSSC dengan bahan TiO<sub>2</sub> telah mencapai lebih dari 14% dalam kondisi laboratorium. Namun, penting untuk dicatat bahwa efisiensi yang dapat diperoleh dalam praktik nyata dapat bervariasi dan masih ada tantangan dalam meningkatkan efisiensi tersebut. Pengembangan dan penelitian terus dilakukan untuk meningkatkan efisiensi DSSC dengan bahan TiO<sub>2</sub> serta memperbaiki stabilitas dan biaya produksinya. Demikian halnya untuk DSSC dengan material TiO<sub>2</sub>-GO; memiliki kinerja tinggi dan sensitivitas yang baik, tetapi DSSC dengan TiO<sub>2</sub> nanopartikel lebih teruji dan stabil dalam jangka panjang.

**Kata Kunci:** Green synthesis, Dye-Sensitize solar cells, fotoanoda, Nanopartikel TiO<sub>2</sub>

### Abstract

This research aims to study the technique of green synthesis of nanoparticles, especially for TiO<sub>2</sub> nanoparticles. Various types of plants can be used as a source of extraction compounds (camping agents, and deionization of Ti metal) in the synthesis of TiO<sub>2</sub> nanoparticles, including purslane leaves (*Portulaca Oleracea* L.), *Pisonia grandis* (Leechai kottai keerai), corn (*Zea mays*), Kesumba Keling (*bixa orellana*), Kesumba seeds (*Bixa orellana* seed), Oranges (*Citrus Limetta*), Clabet (*Trigonella foenum -graecum*), Moringa Leaves (*Moringa Oleifera* L.), and Turi (*Sesbania grandiflora*). TiO<sub>2</sub> nanoparticles can be applied as dye-sensitized solar cells (DSSC). The size of TiO<sub>2</sub> nanoparticles synthesized with TPID precursors and utilizing various plant extractions has resulted in sizes of 20-100 nm (spherical-like) and crystalline sizes of 9-13 nm (tetragonal crystalline). The basic properties of TiO<sub>2</sub> nanoparticles are well described (crystal structure, functional groups, and particle size), while the properties, structures, and charge transport mechanisms of DSSC are also described in detail. The essential parts of the DSSC structure based on TiO<sub>2</sub> nanoparticles are the photoanode, catalyst, and electrolyte. DSSC with TiO<sub>2</sub> nanoparticle photoanode has several advantages, including high efficiency, low cost, high stability, performance under low light, and design flexibility. The efficiency of DSSCs with TiO<sub>2</sub> materials has reached over 14% under laboratory conditions. However, it is essential to note that the efficiencies obtained in actual practice may vary, and there are still challenges in increasing these efficiencies. Development and research continue to improve the efficiency of DSSC with TiO<sub>2</sub> materials and the stability and production costs. Furthermore, DSSC with TiO<sub>2</sub>-GO material; has high performance and sound sensitivity, but DSSC with TiO<sub>2</sub> nanoparticles is more tested and stable in the long term.

**Keywords:** Green synthesis, Dye-Sensitize solar cells, photoanoda, TiO<sub>2</sub> Nanoparticles

## I. PENDAHULUAN

Berdasarkan data Badan Pusat Statistik (BPS), jumlah penduduk Indonesia diproyeksikan sebanyak 275,77 juta jiwa pada 2022. Jumlah tersebut naik 1,13% dibandingkan pada tahun lalu yang sebanyak 272,68 juta jiwa. Jumlah penduduk yang sangat besar tersebut, memiliki kebutuhan energi yang besar. Kebutuhan energi diperlukan untuk memenuhi kebutuhan listrik, transportasi, industri, rumah tangga, dan sektor-sektor lainnya (Kumar et al., 2023).

Perubahan iklim adalah perubahan jangka panjang dalam pola cuaca dan suhu bumi yang disebabkan oleh peningkatan emisi gas rumah kaca. Kebutuhan energi bersih saat ini adalah penting untuk mengurangi emisi gas rumah kaca dan mengatasi dampak perubahan iklim. Energi bersih, seperti surya dan angin, tidak menghasilkan emisi gas rumah kaca dan dapat diperbaharui secara terus-menerus. Beralih ke energi bersih juga menciptakan peluang ekonomi baru dan mempromosikan keberlanjutan. Untuk memenuhi kebutuhan energi tersebut, Indonesia dianggap memiliki potensi pengembangan teknologi energi berbasis sel surya (*solar cell*) di Indonesia sangat besar (Karim et al., 2019a).

Berikut adalah beberapa faktor yang mendukung potensi ini: (a) Sumber matahari yang kaya: Indonesia memiliki iklim tropis dengan sinar matahari yang melimpah sepanjang tahun. Wilayah Indonesia secara geografis terletak di khatulistiwa, sehingga memiliki potensi energi matahari yang sangat besar. Hal ini membuat Indonesia menjadi tempat yang ideal untuk pengembangan teknologi energi surya. (b) Ketergantungan terhadap energi fosil: Indonesia masih sangat bergantung pada sumber energi fosil seperti minyak bumi dan batu bara. Mengembangkan teknologi energi surya dapat membantu mengurangi ketergantungan terhadap sumber energi fosil yang terbatas dan berkontribusi pada emisi gas rumah kaca. (c) Pertumbuhan ekonomi dan kebutuhan energi yang meningkat: Pertumbuhan ekonomi yang pesat di Indonesia menyebabkan meningkatnya permintaan akan energi. Pengembangan energi surya dapat menjadi solusi untuk memenuhi kebutuhan energi yang terus meningkat dengan cara yang berkelanjutan dan ramah lingkungan. (d) Potensi pemanfaatan lahan yang luas: Indonesia memiliki lahan yang luas yang dapat

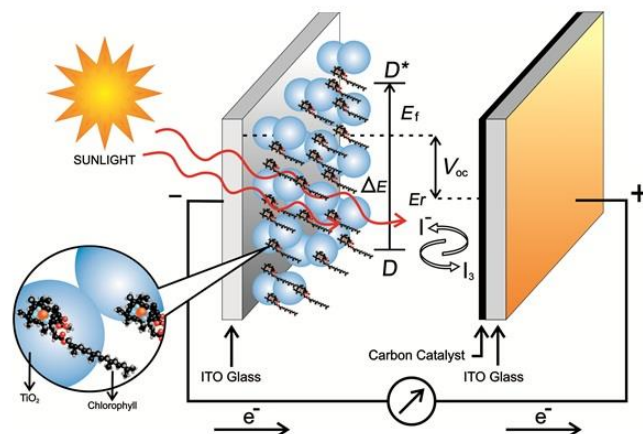
dimanfaatkan untuk instalasi panel surya. Selain atap gedung dan bangunan komersial, lahan terbuka seperti lahan pertanian, area pesisir, dan pulau-pulau kecil dapat dimanfaatkan untuk pembangunan proyek energi surya. (e) *Dukungan pemerintah*: Pemerintah Indonesia telah memberikan dukungan dan kebijakan yang mendorong pengembangan energi terbarukan, termasuk energi surya. Inisiatif seperti *Feed-in Tariff* (FiT) dan insentif fiskal telah diperkenalkan untuk mendorong investasi dan penggunaan energi surya di Indonesia (Daniswara et al., 2020).

Konsep penggunaan energi matahari telah berkembang sejak abad ke-18. Pada tahun 1839, Edmond Becquerel, seorang ilmuwan Prancis, menemukan efek fotovoltaiik (PV) yang menjadi awal penerapan energi surya. Efek fotovoltaiik terjadi ketika bahan semikonduktor menyerap cahaya dan menghasilkan tegangan listrik. Generasi pertama sel surya menggunakan kristal silikon. Pada tahun 1887, seorang ilmuwan Jerman bernama Hertz menemukan bahwa foton dalam cahaya dapat melepaskan elektron bebas dari permukaan padat untuk menghasilkan daya, terutama dalam sinar UV. Sel surya modern mengandalkan efek fotolistrik untuk mengubah sinar matahari menjadi listrik (Sengupta et al., 2016) (Sharma et al., 2018).

Fabrikasi sel surya secara umum diklasifikasikan menjadi tiga kategori berbeda berdasarkan sifat material dan periode waktu perkembangan mereka. Diantaranya: (1) bahan berbasis silikon (kristal dan amorf) termasuk dalam *sel surya generasi pertama*. Diawali pada tahun 1953 hingga 1956, fisikawan di Laboratorium Bell berhasil membuat sel surya silikon dengan efisiensi 6%, yang lebih efisien daripada selenium. Penemuan ini membuka jalan untuk mengidentifikasi kemampuan sel surya dalam menyediakan daya bagi peralatan listrik; eksperimen ini kemudian dilanjutkan untuk meningkatkan kinerjanya dan mencoba membuat perangkat baru untuk komersialisasi. (2) bahan semikonduktor (golongan III-IV) termasuk dalam *sel surya generasi kedua (1970)*, dikembangkanlah sel surya film tipis generasi kedua. Sel surya generasi kedua sering digambarkan sebagai sel surya film tipis yang baru mampu mengubah 30% radiasi matahari menjadi energi listrik. Bahan semikonduktor yang digunakan dalam generasi ini adalah *copper indium gallium selenide* (CIGS), *cadmium telluride* (CdTe), dan *gallium arsenide* (GaAs). (3) bahan baru, termasuk dalam *sel surya generasi ketiga (1990)*, Teknologi sel surya generasi baru ini mencakup *dye-sensitized solar cells* (DSSCs), sel surya organik/polimer, sel surya quantum dot, sel surya perovskite, dll. Efisiensi konversi energi dari sel surya generasi ketiga ini lebih rendah dibandingkan dengan sel surya berbasis silikon dan sel surya film tipis, tetapi memiliki keunggulan tertentu seperti biaya proses yang rendah dan dampak lingkungan yang lebih kecil, sehingga memicu penelitian dan pengembangan intensif di bidang ini (Kishore Kumar et al., 2020)

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). Penangkapan foton mengakibatkan eksitasi elektron pada molekul dye dan elektron masuk ke pita konduksi dari TiO<sub>2</sub> meninggalkan molekul dye sehingga molekul dye teroksidasi. Performansi DSSC dipengaruhi oleh banyaknya pewarna yang terserap pada substrat kaca ITO yang telah terdeposisi lapisan TiO<sub>2</sub> dan luas penampang Fotovoltaiik dalam DSSC diharapkan mampu menjadi energy alternative dengan efisiensi energy yang besar dan murah, ringan dan memiliki daya tahan lama. Dalam penerapannya dapat digunakan dengan berbagai pewarna karena peranannya yang penting dalam kerja DSSC untuk menentukan respons cahaya sehingga dapat mempengaruhi efisiensi dari fotovoltaiik (Khan et al., 2020). DSSC karena kemudahan proses fabrikasi dan biaya rendah mendapat perhatian di pasar fotovoltaiik. Adapun PCE DSSC telah meningkat dari 7% menjadi 14% (Babar et al., 2020). Di Swiss DSSC menjadi satu-satunya jenis sel surya berbasis bahan organik dengan penyebaran komersial yang signifikan seperti fasilitas yang mampu menghasilkan 2000 kWh per tahun (Sengupta et al., 2016).

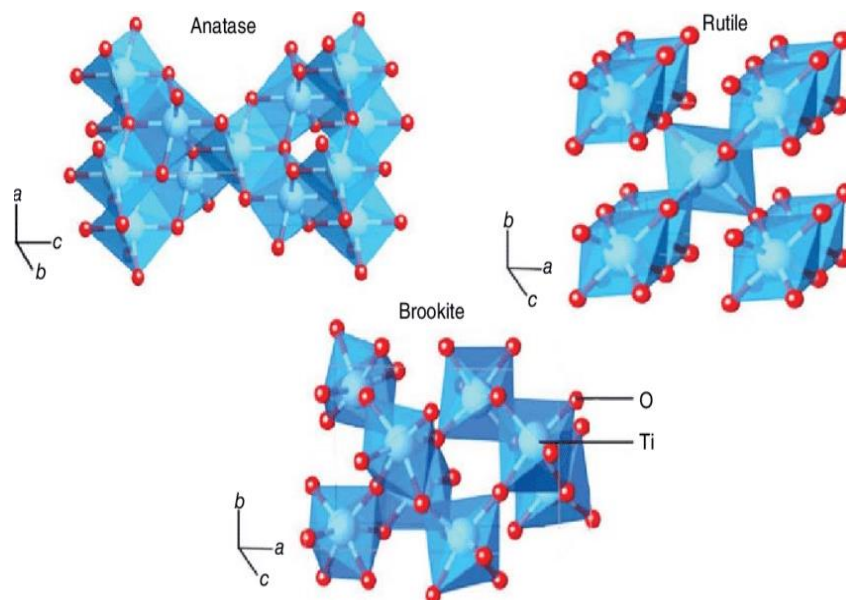
TiO<sub>2</sub> (*titanium dioxide*) adalah material yang umum digunakan dalam sel surya sensitif pewarna DSSC. Material TiO<sub>2</sub> berstruktur pori-pori dan kekasaran permukaan tinggi memberikan luas permukaan yang besar untuk penyerapan cahaya. Cahaya yang masuk melalui TiO<sub>2</sub> diserap oleh pewarna yang terikat di permukaan TiO<sub>2</sub>, dan energi cahaya ini diubah menjadi electron. Elektron yang diinjeksikan ke TiO<sub>2</sub> kemudian dapat digunakan untuk menghasilkan arus listrik melalui rangkaian eksternal yang memungkinkannya bertahan dalam jangka waktu yang lama (Boro et al., 2018).



### Dye-Sensitized Solar Cells (DSSC) Using Sensitizer from Extract of *Portulaca oleracea* L.

**Gambar 1.** DSSC dengan Fotoanoda TiO<sub>2</sub> dengan Sensitizer dari ekstrak *Portulaca oleracea* L. (Krisdiyanto et al., 2015)

Nanopartikel TiO<sub>2</sub> memiliki beberapa keunggulan sebagai **fotoanoda** pada sistem *Dye-Sensitized Solar Cells* (DSSC). Berikut adalah beberapa keunggulan utama: (a) Efisiensi Penangkapan Cahaya yang Tinggi: Nanopartikel TiO<sub>2</sub> memiliki struktur pori-pori yang besar dan luas permukaan yang tinggi. Hal ini memungkinkan penyerapan cahaya yang lebih efisien dan meningkatkan efisiensi konversi energi surya. Luas permukaan yang besar juga memberikan lebih banyak ruang untuk menempatkan lapisan sensitiser (dye) pada permukaan nanopartikel, meningkatkan penyerapan cahaya. Pada Gambar 1 dapat dilihat struktur fotoanoda DSSC dengan material nanopartikel TiO<sub>2</sub> dengan zat pewarna dari ekstraksi *Portulaca Oleracea* L. (daun tanaman krokot). (b) Stabilitas Kimia dan Fisik yang Tinggi: TiO<sub>2</sub> merupakan bahan yang sangat stabil secara kimia dan fisik. Hal ini membuatnya tahan terhadap korosi, degradasi, dan oksidasi, yang sangat penting untuk menjaga kinerja fotoanoda dalam jangka waktu yang lama. Keberlanjutan dan ketahanan yang tinggi ini membuat nanopartikel TiO<sub>2</sub> menjadi pilihan yang baik untuk aplikasi DSSC yang membutuhkan umur panjang dan daya tahan. (c) Potensial Elektrokimia yang Tepat: TiO<sub>2</sub> memiliki level energi pasca-konduksi yang sesuai dengan kebutuhan dalam proses transfer elektron pada DSSC. Ini memungkinkan pengambilan dan pemindahan elektron yang efisien dari fotoanoda ke elektrolit, yang merupakan langkah penting dalam menghasilkan arus listrik. (d) Transparansi Optik: Meskipun nanopartikel TiO<sub>2</sub> memiliki struktur pori-pori yang padat, tetapi tetap dapat memberikan transparansi optik yang cukup baik. Ini memungkinkan cahaya matahari untuk melewati lapisan fotoanoda dan mencapai lapisan sensitiser (dye) di atasnya untuk penyerapan cahaya. Transparansi optik ini penting dalam memaksimalkan penyerapan cahaya dan efisiensi sel surya. (e) Biokompatibilitas dan Ramah Lingkungan: TiO<sub>2</sub> adalah bahan yang umum digunakan dalam berbagai aplikasi, termasuk kosmetik dan makanan, karena dianggap aman dan memiliki sifat biokompatibel. Selain itu, TiO<sub>2</sub> adalah bahan yang ramah lingkungan dan tidak mencemari lingkungan saat digunakan dalam sel surya. Kombinasi dari efisiensi penangkapan cahaya yang tinggi, stabilitas kimia dan fisik, potensial elektrokimia yang tepat, transparansi optik, biokompatibilitas, dan keberlanjutan menjadikan nanopartikel TiO<sub>2</sub> sebagai pilihan yang baik sebagai fotoanoda dalam sistem DSSC (Karim et al., 2019b).



**Gambar 2.** Struktur kristal TiO<sub>2</sub> untuk DSSC: Anastase, Rultile, dan Brookite (Karthick et al., 2019)

TiO<sub>2</sub> dapat terbentuk dalam berbagai struktur, termasuk rutil, anatase, dan brookite, dengan rutil dan anatase yang paling umum. Brookite telah mendapatkan minat baru karena sifat katalitiknya yang serbaguna. Namun, mensintesis brookite berkualitas tinggi itu menantang, terutama dalam bentuk film tipis. Sintesis fase metastabil seperti brookite membutuhkan pengetahuan tentang reaksi kesetimbangan dan non-kesetimbangan. Pemilihan fase selama sintesis tidak hanya didasarkan pada termodinamika kesetimbangan curah, tetapi juga pada faktor-faktor seperti efek ukuran terbatas, kinetika nukleasi, dan stoikiometri. Tidak ada pemahaman mekanistik yang mapan tentang pertumbuhan brookite, yang mengarah ke berbagai pendekatan sintesis dalam literatur. Pendekatan sintesis berbasis solusi dan berbasis uap telah menghasilkan hasil yang tidak konsisten, dengan metode berbasis uap yang sangat menantang karena keseimbangan termodinamika yang halus dan tidak adanya spesies pembantu. Sintesis brookite film tipis mengandalkan pencocokan kisi substrat, tetapi deposisi brookite murni pada substrat amorf sebagian besar belum dijelajahi.

## II. DYE-SENSITIZER SOLAR CELLS NANOPARTIKEL TiO<sub>2</sub>

### 2.1. Struktur DSSC

Dengan mengamati struktur DSSC pada Gambar 1 diatas: terdiri dari sepasang substrat kaca berlapis TCO (*Transparent Conducting Oxide*) sebagai elektroda dan counter elektroda, elektrolit redoks yang mengandung iodida dan ion tri-iodida (I<sub>3</sub><sup>-</sup>)/lapisan karbon sebagai katalis, TiO<sub>2</sub> nano berpori kristal sebagai photoanode, dan dye photosensitizer Semua komponen disusun di depan struktur sandwich dimana lapisan atas adalah elektroda kerja sebagai lapisan awal dalam menerima foton dan lapisan bawah adalah elektroda lawan dan bagian tengah adalah elektrolit untuk regenerasi elektron. Kriteria dye yang dapat digunakan sebagai dye sensitizer adalah intensitas adsorpsi pada panjang gelombang tampak, adsorpsi kuat pada permukaan semikonduktor, memiliki kemampuan menginjeksikan elektron ke pita konduksi semikonduktor, dan memiliki gugus =O atau -H pada berikatan dengan permukaan TiO<sub>2</sub> yang dapat meningkatkan laju reaksi transfer elektron. Ekstrak kroket sebagai dye-sensitizer mengandung beberapa senyawa seperti asam oksalat, kafein, asam maleat, alkaloid, kumarin, flavonoid, glikosida jantung, antrakuinon, glikosida, alanin, katekol, saponin, dan tannin (Karim et al., 2019b)

Dapat dijelaskan secara sederhana mekanisme kerja DSSC dengan nanopartikel TiO<sub>2</sub> sebagai fotoanoda, yaitu:

- (1). Penyerapan Cahaya: Cahaya matahari pertama-tama diserap oleh dye sensitizer yang terdapat pada permukaan nanopartikel TiO<sub>2</sub>. Dye sensitizer ini dapat menyerap berbagai panjang gelombang cahaya, termasuk cahaya tampak dan sebagian cahaya inframerah.
- (2). Generasi Elektron: Setelah dye sensitizer menyerap cahaya, elektron pada dye sensitizer tersebut terangkat ke level energi yang lebih tinggi. Elektron ini kemudian ditransfer ke nanopartikel TiO<sub>2</sub> yang bertindak sebagai konduktor elektron.
- (3). Transfer Elektron: Elektron-elektron yang ditransfer ke nanopartikel TiO<sub>2</sub> bergerak melalui jaringan pori-pori nanopartikel TiO<sub>2</sub> yang luas. Porositas nanopartikel TiO<sub>2</sub> memungkinkan elektroda konduktif untuk mengambil elektron-elektron ini dan menghantarkannya ke sirkuit eksternal untuk menghasilkan arus listrik.
- (4). Regenerasi Dye Sensitizer: Setelah kehilangan elektron, dye sensitizer membutuhkan regenerasi. Ini dilakukan dengan bantuan elektrolit yang berfungsi sebagai mediator redoks. Elektrolit mengambil elektron dari elektroda konduktif dan mengembalikannya ke dye sensitizer. Proses ini memungkinkan dye sensitizer untuk kembali ke keadaan awalnya dan siap untuk menyerap cahaya matahari lagi.

Aliran Arus Listrik: Elektron-elektron yang ditransfer dari dye sensitizer ke elektroda konduktif, melalui nanopartikel TiO<sub>2</sub>, dan menuju sirkuit eksternal, menghasilkan aliran arus listrik. Arus ini dapat digunakan untuk menggerakkan perangkat listrik atau disimpan dalam baterai untuk digunakan di masa mendatang. Mekanisme kerja DSSC dengan nanopartikel TiO<sub>2</sub> sebagai fotoanoda didasarkan pada penyerapan cahaya oleh dye sensitizer, transfer elektron ke nanopartikel TiO<sub>2</sub>, dan aliran arus listrik yang dihasilkan. Proses ini memungkinkan DSSC untuk mengubah energi cahaya matahari menjadi energi listrik secara efisien (Babar et al., 2020)

## 2.2. Dye-Sensitizer Solar Cells Nanopartikel TiO<sub>2</sub> -Prinsip DSSC Nanopartikel TiO<sub>2</sub>

Cara kerja dan karakteristik Dye Adsorption Time pada Sel Surya Sensitif Dye dengan ekstrak tanaman pada TiO<sub>2</sub> mengacu pada durasi di mana sensitiser pewarna yang berasal dari ekstrak tanaman dibiarkan menyerap ke permukaan nanopartikel TiO<sub>2</sub> pada Sel Surya Sensitif Dye (DSSCs). Berikut adalah penjelasan tentang prinsip kerja dan karakteristik DSSCs dengan sensitiser pewarna berbasis ekstrak tanaman dan TiO<sub>2</sub>:

- (1). Ekstraksi Pewarna: Ekstrak tanaman yang mengandung pewarna alami diperoleh dari tanaman seperti bayam, buah beri, atau bahan tanaman lainnya. Ekstrak ini diproses untuk mendapatkan pewarna alami yang terkandung di dalamnya (Semalti and Sharma, 2020)
- (2). Persiapan Elektroda TiO<sub>2</sub>: Nanopartikel TiO<sub>2</sub> dideposisi pada substrat konduktif, seperti kaca konduktif transparan, untuk membentuk fotoanoda pada DSSC. Lapisan TiO<sub>2</sub> memberikan luas permukaan yang besar untuk penyerapan pewarna dan transfer elektron.
- (3). Penyerapan Pewarna: Sensitiser pewarna berbasis ekstrak tanaman kemudian diaplikasikan ke permukaan nanopartikel TiO<sub>2</sub>. Proses penyerapan ini memungkinkan molekul-molekul pewarna untuk melekat pada permukaan TiO<sub>2</sub>, membentuk lapisan monolayer atau multilayer dari molekul-molekul pewarna
- (4). Penyerapan Cahaya: Ketika DSSC terkena sinar matahari, molekul-molekul pewarna menyerap foton, yang mengexcite elektron-elektron dalam molekul-molekul pewarna ke tingkat energi yang lebih tinggi. Energi cahaya yang diserap diubah menjadi keadaan terexcite pada pewarna.
- (5). Injeksi Elektron: Setelah menyerap cahaya, elektron-elektron yang terexcite dalam molekul-molekul pewarna diinjeksikan ke pita konduksi nanopartikel TiO<sub>2</sub>. TiO<sub>2</sub> bertindak sebagai penghantar elektron, memungkinkan elektron-elektron yang diinjeksikan untuk bergerak dengan bebas.
- (6). Regenerasi: Setelah injeksi elektron, molekul-molekul pewarna berada dalam keadaan teroksidasi. Untuk meregenerasi pewarna, pasangan redoks, biasanya dalam larutan elektrolit, menyumbangkan elektron kepada molekul-molekul pewarna yang teroksidasi, mengembalikannya ke keadaan awal. Hal ini meregenerasi pewarna dan memungkinkannya untuk menyerap lebih banyak foton.
- (7). Pengumpulan Elektron: Elektron-elektron yang diinjeksikan mengalir melalui nanopartikel TiO<sub>2</sub> dan dikumpulkan oleh substrat konduktif, menciptakan arus listrik. Arus ini dapat diekstrak dan digunakan untuk menggerakkan perangkat listrik atau disimpan dalam baterai (Patil, 2020)

Karakteristik DSSCs dengan sensitiser pewarna berbasis ekstrak tanaman dan TiO<sub>2</sub> meliputi:

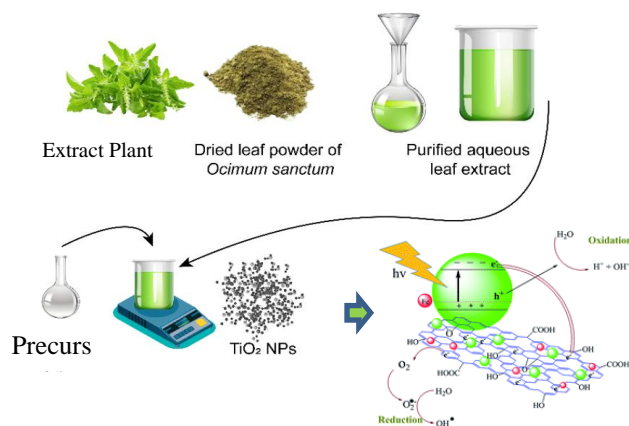
- (1). Terbarukan dan Berkelanjutan: Ekstrak tanaman menyediakan sumber pewarna alami yang terbarukan, menjadikannya ramah lingkungan dan berkelanjutan dibandingkan dengan pewarna sintetis.
- (2). Ekonomis: Ekstrak tanaman seringkali tersedia secara luas dan ekonomis dibandingkan dengan pewarna sintetis, yang dapat berkontribusi pada ketersediaan DSSCs secara umum.
- (3). Rentang Penyerapan yang Luas: Pewarna berbasis ekstrak tanaman dapat memiliki rentang penyerapan yang luas, memungkinkan mereka untuk menyerap spektrum cahaya matahari yang lebih lebar, termasuk cahaya tampak dan mungkin juga cahaya inframerah dekat.
- (4). Stabilitas Sensitiser: Stabilitas sensitiser pewarna berbasis ekstrak tanaman dan kemampuannya untuk mempertahankan sifat penyerapan mereka seiring waktu memengaruhi kinerja jangka panjang dari DSSCs.
- (5). Efisiensi: Efisiensi DSSCs dengan sensitiser pewarna berbasis ekstrak tanaman dan TiO<sub>2</sub> dapat bervariasi tergantung pada jenis pewarna dan metode ekstraksi yang digunakan, serta desain sel secara keseluruhan dan teknik fabrikasi (Raj and Prasanth, 2016)

Perlu dicatat bahwa kinerja DSSCs dengan sensitiser pewarna berbasis ekstrak tanaman dan TiO<sub>2</sub> dapat dipengaruhi oleh berbagai faktor, termasuk metode ekstraksi pewarna, kemurnian pewarna, pembebanan pewarna, dan desain sel secara keseluruhan. Biasanya dilakukan optimisasi eksperimental untuk mencapai kinerja dan efisiensi terbaik untuk pewarna berbasis ekstrak tanaman tertentu dalam DSSCs (Ghann et al., 2019)

### III. GREEN SYNTHESIS TiO<sub>2</sub> NANOPARTICLES

Green synthesis nanopartikel adalah metode sintesis nanopartikel yang dilakukan menggunakan bahan-bahan alami dan ramah lingkungan. Pendekatan ini bertujuan untuk mengurangi penggunaan bahan kimia berbahaya dan dampak negatif terhadap lingkungan dalam produksi nanopartikel. 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)

Keunggulan dari green synthesis nanopartikel meliputi: (1) *ramah lingkungan*: Metode ini menggunakan bahan-bahan alami yang berkelanjutan dan dapat diperbaharui, mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan dan manusia. (Ghio et al., 2020) (2) *bahan baku mudah didapat*: Sumber bahan alami yang digunakan dalam green synthesis, seperti tanaman atau limbah organik, seringkali mudah didapat, murah, dan dapat diperbaharui. (3) *biokompatibilitas*: Nanopartikel yang dihasilkan melalui green synthesis cenderung memiliki sifat biokompatibel, yang berarti mereka lebih bersahabat dengan lingkungan biologis dan memiliki potensi aplikasi dalam bidang biomedis. (4) *keamanan*: Metode green synthesis mengurangi risiko terhadap paparan bahan kimia berbahaya, sehingga meningkatkan keamanan dalam proses produksi nanopartikel. (5) *juga potensi diversitas aplikasi*: Nanopartikel yang disintesis secara hijau dapat digunakan dalam berbagai aplikasi, termasuk bidang katalisis, elektronik, fotokatalisis, kedokteran, dan bidang-bidang lainnya (Kishore Kumar et al., 2020)



**Gambar 3.** Green synthesis TiO<sub>2</sub> NPs: untuk aplikasi DSSC (Ahmad et al., 2022; Sedghi and Heidari, 2016)

Tahapan dalam green synthesis nanopartikel TiO<sub>2</sub> dapat melibatkan beberapa langkah, tergantung pada metode yang digunakan. Berikut adalah tahapan umum yang dapat terjadi dalam green synthesis nanopartikel TiO<sub>2</sub>:

- (a). Pemilihan Bahan Alami: Tahap awal adalah pemilihan bahan alami yang akan digunakan dalam sintesis, seperti tanaman, ekstrak tanaman, atau bahan limbah organik. Bahan alami tersebut harus mengandung senyawa yang dapat berperan sebagai reduktor atau agen penstabil dalam sintesis nanopartikel TiO<sub>2</sub>.
- (b). Ekstraksi Senyawa Aktif: Bahan alami diekstraksi untuk mendapatkan senyawa aktif yang akan digunakan dalam sintesis nanopartikel TiO<sub>2</sub>. Metode ekstraksi seperti ekstraksi pelarut, ekstraksi dengan pelarut superkritis, atau metode lainnya dapat digunakan untuk mengisolasi senyawa aktif.
- (c). Reduksi dan Stabilisasi: Senyawa aktif dari bahan alami digunakan sebagai reduktor untuk mengurangi senyawa titanium yang tepat menjadi nanopartikel TiO<sub>2</sub>. Selama proses ini, agen penstabil juga dapat ditambahkan untuk mencegah agregasi atau pertumbuhan berlebihan dari nanopartikel (Patil, 2020).
- (d). Karakterisasi: Setelah sintesis selesai, nanopartikel TiO<sub>2</sub> yang dihasilkan harus dikarakterisasi untuk memeriksa ukuran partikel, distribusi ukuran, struktur kristal, dan sifat fisikokimia lainnya. Teknik karakterisasi seperti spektroskopi UV-Vis, difraksi sinar-X, mikroskopi elektron, dan analisis termal dapat digunakan.
- (e). Aplikasi: Nanopartikel TiO<sub>2</sub> yang disintesis secara hijau dapat digunakan dalam berbagai aplikasi, seperti katalisis fotokimia, fotokatalisis, elektrokimia, atau aplikasi di bidang energi dan lingkungan. Selain itu, uji toksisitas juga dapat dilakukan untuk memeriksa dampak nanopartikel terhadap lingkungan dan manusia (Ghann et al., 2019)

Setiap tahapan dalam green synthesis nanopartikel TiO<sub>2</sub> memerlukan penelitian dan optimisasi yang cermat untuk mencapai hasil yang diinginkan. Selain itu, perlu diingat bahwa berbagai metode green synthesis dapat digunakan dan dapat terjadi variasi dalam prosedur sintesis tergantung pada bahan alami dan kondisi eksperimental yang digunakan.

Green synthesis nanopartikel TiO<sub>2</sub>, dapat dilakukan dengan menggunakan berbagai ekstrak tanaman (Tabel 1), di antaranya: ekstrak daun krokot (*Portulaca Oleracea L.*) (UIN sunan kalijaga yogyakarta et al., 2015), *Leechai kottai keerai* (Vembu et al., 2022), *zea mays and bixa orellana* (Huamán Aguirre et al., 2021), *Bixa orellana seed extract* (Maurya et al., 2019), *Citrus Limetta extract* (Nabi et al., 2021), *Trigonella foenum-graecum extract* (Subhapiya and Gomathipriya, 2018), *Moringa Oleifera Leaf Extract* (Pushpamalini et al., 2021), *Moringa oleifera leaves* (Sivaranjani and Philominathan, 2016), *Sesbania grandiflora* (Srinivasan et al., 2019). Beberapa contoh green synthesis nanopartikel TiO<sub>2</sub> dengan ekstraksi beberapa tanaman, adalah sebagai berikut:

### 1. Sintesis Nanopartikel TiO<sub>2</sub> dengan *Portulaca Oleracea L.*

Green synthesis atau sintesis hijau dari nanopartikel TiO<sub>2</sub> menggunakan ekstrak *Portulaca oleracea L.* melibatkan metode yang ramah lingkungan dan berkelanjutan untuk menghasilkan nanopartikel TiO<sub>2</sub> dengan memanfaatkan senyawa alami yang terdapat dalam ekstrak tumbuhan *Portulaca oleracea L.*, yang juga dikenal sebagai *purslane*. Berikut adalah penjelasan langkah-langkah dalam proses sintesis hijau tersebut (Krisdiyanto et al., 2015; Mufidah et al., 2015; Vembu et al., 2022):

- (a). Persiapan ekstrak *Portulaca oleracea L.*: Tumbuhan *Portulaca oleracea L.* dikumpulkan dan bagian yang diinginkan, seperti daun atau batang, diekstraksi untuk mendapatkan ekstrak. Metode ekstraksi yang umum digunakan adalah ekstraksi pelarut, seperti penggunaan air atau pelarut organik seperti metanol atau etanol. Ekstrak ini mengandung senyawa bioaktif yang dapat berfungsi sebagai agen pereduksi dan penstabil dalam sintesis nanopartikel TiO<sub>2</sub>.



- (b). Persiapan larutan prekursor titanium: Larutan yang mengandung prekursor titanium, seperti titanium klorida (TiCl<sub>4</sub>) atau titanium isopropoksida, dipersiapkan secara terpisah. Prekursor ini akan berfungsi sebagai sumber ion titanium untuk sintesis nanopartikel.
- (c). Campuran larutan: Ekstrak *Portulaca oleracea* L. dicampur dengan larutan prekursor titanium di bawah kondisi yang terkontrol. Campuran ini biasanya diaduk atau dipanaskan untuk memastikan pencampuran yang merata dan interaksi yang baik antara bahan reaktan.
- (d). Reduksi dan nukleasi: Senyawa bioaktif yang terdapat dalam ekstrak *Portulaca oleracea* L., seperti senyawa fenolik, flavonoid, atau senyawa antioksidan lainnya, berinteraksi dengan ion titanium dalam larutan prekursor. Reaksi reduksi ini menghasilkan pembentukan nanopartikel TiO<sub>2</sub> melalui proses nukleasi.
- (e). Pertumbuhan dan penstabilan: Nanopartikel TiO<sub>2</sub> yang terbentuk akan terus tumbuh melalui penambahan ion titanium tambahan dan reduksi oleh senyawa bioaktif yang terdapat dalam ekstrak *Portulaca oleracea* L. Senyawa-senyawa ini juga berfungsi sebagai penstabil untuk mencegah agregasi dan menjaga stabilitas nanopartikel.
- (f). Pemurnian dan pengeringan: Setelah terbentuknya nanopartikel TiO<sub>2</sub> dengan ukuran dan stabilitas yang diinginkan, larutan yang dihasilkan biasanya dipurifikasi menggunakan teknik seperti sentrifugasi atau filtrasi untuk menghilangkan kontaminan atau bahan reaktan yang tidak terpakai. Nanopartikel yang telah dipurifikasi kemudian dikeringkan untuk karakterisasi dan aplikasi lebih lanjut.

Proses sintesis hijau ini memiliki keunggulan karena mengeliminasi penggunaan bahan kimia berbahaya dan energi yang intensif. Selain itu, penggunaan ekstrak *Portulaca oleracea* L. sebagai agen pereduksi dan penstabil dalam sintesis nanopartikel TiO<sub>2</sub> menunjukkan pendekatan yang ramah lingkungan (UIN sunan kalijaga yogyakarta et al., 2015).

## 2. Sintesis Nanopartikel TiO<sub>2</sub> dengan *Bixa orellana* seed extract

Green synthesis atau sintesis hijau dari nanopartikel TiO<sub>2</sub> menggunakan ekstrak biji *Bixa orellana* melibatkan metode yang ramah lingkungan dan berkelanjutan untuk menghasilkan nanopartikel TiO<sub>2</sub> dengan memanfaatkan senyawa alami yang terdapat dalam ekstrak biji *Bixa orellana*, yang juga dikenal sebagai biji achiote atau biji kunyit. Berikut adalah penjelasan langkah-langkah dalam proses sintesis hijau tersebut (Huamán Aguirre et al., 2021; Maurya et al., 2019):

- (a). Persiapan ekstrak biji *Bixa orellana*: Biji *Bixa orellana* dikumpulkan dan diekstraksi untuk mendapatkan ekstrak. Metode ekstraksi yang umum digunakan adalah ekstraksi pelarut, seperti penggunaan air atau pelarut organik seperti etanol. Ekstrak biji *Bixa orellana* ini mengandung senyawa bioaktif yang dapat berfungsi sebagai agen pereduksi dan penstabil dalam sintesis nanopartikel TiO<sub>2</sub>.
- (b). Persiapan larutan prekursor titanium: Larutan yang mengandung prekursor titanium, seperti titanium klorida (TiCl<sub>4</sub>) atau titanium isopropoksida, dipersiapkan secara terpisah. Prekursor ini berfungsi sebagai sumber ion titanium untuk sintesis nanopartikel.
- (c). Campuran larutan: Ekstrak biji *Bixa orellana* dicampur dengan larutan prekursor titanium dalam kondisi yang terkontrol. Campuran ini biasanya diaduk atau dipanaskan untuk memastikan pencampuran yang merata dan interaksi yang baik antara bahan reaktan.
- (d). Reduksi dan nukleasi: Senyawa bioaktif yang terdapat dalam ekstrak biji *Bixa orellana*, seperti senyawa fenolik, flavonoid, atau senyawa antioksidan lainnya, berinteraksi dengan ion titanium dalam larutan prekursor. Reaksi reduksi ini menghasilkan pembentukan nanopartikel TiO<sub>2</sub> melalui proses nukleasi.
- (e). Pertumbuhan dan penstabilan: Nanopartikel TiO<sub>2</sub> yang terbentuk akan terus tumbuh melalui penambahan ion titanium tambahan dan reduksi oleh senyawa bioaktif yang terdapat dalam ekstrak

biji Bixa orellana. Senyawa-senyawa ini juga berfungsi sebagai penstabil untuk mencegah agregasi dan menjaga stabilitas nanopartikel.

- (f). Pemurnian dan pengeringan: Setelah terbentuknya nanopartikel TiO<sub>2</sub> dengan ukuran dan stabilitas yang diinginkan, larutan yang dihasilkan biasanya dipurifikasi menggunakan teknik seperti sentrifugasi atau filtrasi untuk menghilangkan kontaminan atau bahan reaktan yang tidak terpakai. Nanopartikel yang telah dipurifikasi kemudian dikeringkan untuk karakterisasi dan aplikasi lebih lanjut.

Proses sintesis hijau ini memiliki keunggulan karena mengeliminasi penggunaan bahan kimia berbahaya dan energi yang intensif. Selain itu, penggunaan ekstrak biji Bixa orellana sebagai agen pereduksi dan penstabil dalam sintesis nanopartikel TiO<sub>2</sub> menunjukkan pendekatan yang ramah lingkungan.

**Table 1.** DSSC berbasis Nanopartikel TiO<sub>2</sub>: Green Synthesis

Plant Extract	Chemical Composition	Size		References
		Particles	Crystalline	
<i>Portulaca oleracea</i> . <i>L</i>	Flavonoids, alkaloids, polysaccharides, fatty acids, terpenoids, sterols, proteins, vitamins, and mineral	≈ 21,2 nm spherical	≈ 31-42 tetragonal (JCPDS card number 89-4920)	(Krisdiyanto et al., 2015)
<i>Leechai kottai keerai</i>	the SaOS-2 cells, neutral red, 0.5 percent formaldehyde, 1% calcium chloride	≈ 34 nm spherical shape	≈ 31-42 nm	(Vembu et al., 2022)
<i>Zea mays and Bixa orellana</i>	achiote, ethanolic, the conductive substrate,	≈ 52 nm	≈ 435, 460 and 490 nm	(Huamán Aguirre et al., 2021)
<i>Bixa orellana seed extract</i>	ethanol, precursor materials of Titanium (IV) butoxide [Ti(OBu) <sub>4</sub> ], acetic acid (ACS reagent, ≥99.7%), isopropanol (anhydrous, 99.5%)	≈ 16 nm, 13 nm	≈ 13 nm, 9 nm	(Maurya et al., 2019)
<i>Citrus Limetta extract</i>	titanium butoxide, Citrus limetta	≈ 80-100 nm spherical shape	-	(Nabi et al., 2021)
<i>Trigonella foenum-graecum extract</i>	millipore water, 0.5M solution of Titanium oxy sulphate, 1M sodium hydroxide	≈ 20-90 nm spherical shape	-	(Subhapriya and Gomathipriya, 2018)
<i>Moringa Oleifera Leaf Extract</i>	Titanium tetra isopropoxide, isopropanol, acetonitrile	≈ 6.7-8.3 nm	-	(Pushpamalini et al., 2021)
<i>Moringa oleifera leaves</i>	Moringa oleifera powder, ALE solutio, titanium dioxide solution	≈ 100 nm	-	(Pushpamalini et al., 2021; Srinivasan et al., 2019)
<i>Sesbania grandiflora</i>	titanium dioxide	≈ 43-56 nm	-	(Srinivasan et al., 2019)

### 3. Penggunaan TiO<sub>2</sub> yang telah dilakukan oleh peneliti menggunakan ekstrak daun, buah

#### 3.1. Sintesis Nanopartikel TiO<sub>2</sub> dengan Citrus Limon Juice

Green synthesis atau sintesis hijau dari nanopartikel TiO<sub>2</sub> menggunakan ekstrak jus Citrus limon melibatkan metode yang berkelanjutan dan ramah lingkungan untuk menghasilkan nanopartikel TiO<sub>2</sub> dengan memanfaatkan senyawa alami yang terdapat dalam jus lemon. Berikut ini penjelasan langkah demi langkah tentang proses sintesis hijau (Nabi et al., 2021; Riadi et al., 2022; Singh et al., 2022):

- (a). Persiapan ekstrak jus Citrus limon: Lemon segar dikumpulkan dan jusnya diekstrak. Ekstrak jus ini mengandung berbagai senyawa bioaktif, seperti asam askorbat, asam sitrat, dan antioksidan lainnya, yang bertindak sebagai agen pereduksi dan penstabil dalam proses sintesis.

- (b). Larutan prekursor titanium: Larutan yang mengandung prekursor titanium, seperti titanium klorida (TiCl<sub>4</sub>), dipersiapkan secara terpisah. Prekursor ini berfungsi sebagai sumber ion titanium untuk sintesis nanopartikel.
- (c). Campuran larutan: Ekstrak jus Citrus limon dicampur dengan larutan prekursor titanium dalam kondisi terkontrol. Campuran ini biasanya diaduk atau disonikasi untuk memastikan pencampuran yang baik dan dispersi yang merata dari bahan reaktan.
- (d). Reduksi dan nukleasi: Senyawa bioaktif yang terdapat dalam ekstrak jus lemon, terutama agen pereduksi seperti asam askorbat dan asam sitrat, bereaksi dengan ion titanium dalam larutan prekursor. Reaksi reduksi ini menghasilkan nanopartikel TiO<sub>2</sub> melalui nukleasi.
- (e). Pertumbuhan dan penstabilan: Nanopartikel TiO<sub>2</sub> yang terbentuk terus tumbuh dengan penambahan ion titanium lebih lanjut dan reduksi oleh senyawa bioaktif yang terdapat dalam ekstrak jus lemon. Antioksidan dan agen penstabil lainnya dalam ekstrak membantu mencegah agregasi partikel dan memastikan pembentukan nanopartikel yang stabil.
- (f). Pemurnian dan pengeringan: Setelah ukuran dan stabilitas nanopartikel TiO<sub>2</sub> yang diinginkan tercapai, larutan yang dihasilkan biasanya menjalani teknik pemurnian, seperti sentrifugasi atau filtrasi, untuk menghilangkan prekursor yang tidak bereaksi atau zat pencemar. Nanopartikel yang telah dipurifikasi kemudian dikumpulkan dan dikeringkan untuk karakterisasi dan aplikasi lebih lanjut.

Metode sintesis hijau ini memiliki beberapa keunggulan dibandingkan dengan teknik sintesis konvensional. Metode ini mengeliminasi penggunaan bahan kimia beracun dan proses energi yang intensif, sehingga ramah lingkungan. Selain itu, senyawa alami dalam ekstrak jus Citrus limon memberikan agen pereduksi dan penstabil yang ramah lingkungan dan berkelanjutan untuk sintesis nanopartikel TiO<sub>2</sub>.

### 3.2. Sintesis Nanopartikel TiO<sub>2</sub> dengan ekstraksi *Trigonella foenum-graecum* extract

Sintesis hijau nanopartikel TiO<sub>2</sub> melibatkan penggunaan metode yang ramah lingkungan dan berkelanjutan untuk menghasilkan nanopartikel titanium dioksida. Ekstrak biji *Trigonella foenum-graecum* (fenugreek) dapat digunakan sebagai prekursor dalam sintesis hijau ini. Berikut adalah penjelasan umum tentang bagaimana green synthesis TiO<sub>2</sub> nanopartikel dapat dilakukan menggunakan ekstrak biji *Trigonella foenum-graecum* (Subhapiya and Gomathipriya, 2018):

- (a). Pengumpulan Biji *Trigonella foenum-graecum*: Biji *Trigonella foenum-graecum* dikumpulkan dan dibersihkan untuk menghilangkan kotoran atau kontaminan.
- (b). Persiapan Ekstrak: Biji yang dikumpulkan kemudian dihaluskan atau digiling menjadi serbuk halus untuk meningkatkan luas permukaan dan memfasilitasi ekstraksi senyawa aktif. Ekstraksi dapat dilakukan dengan menggunakan pelarut seperti air atau pelarut organik seperti etanol atau metanol. Serbuk biji direndam dalam pelarut yang sesuai untuk waktu tertentu.
- (c). Filtrasi dan Konsentrasi: Setelah proses perendaman, ekstrak biji *Trigonella foenum-graecum* yang terbentuk difiltrasi untuk memisahkan bagian padat atau serpihan biji. Ekstrak yang dihasilkan kemudian dapat dikonsentrasikan dengan menggunakan teknik evaporasi atau pemekatan lainnya untuk mendapatkan larutan yang lebih pekat.
- (d). Sintesis Nanopartikel TiO<sub>2</sub>: Ekstrak biji *Trigonella foenum-graecum* yang telah dikonsentrasikan digunakan sebagai prekursor dalam sintesis nanopartikel TiO<sub>2</sub>. Prekursor ini dicampur dengan senyawa titanium yang biasanya merupakan senyawa titanium organik atau senyawa anorganik, seperti titanium tetraisopoksida (TTIP), dalam larutan pelarut yang sesuai.
- (e). Reaksi dan Pembentukan Nanopartikel: Campuran reaksi dari prekursor ekstrak biji *Trigonella foenum-graecum* dan senyawa titanium diolah pada suhu dan waktu tertentu. Reaksi ini memicu pembentukan dan pertumbuhan nanopartikel TiO<sub>2</sub>. Komponen bioaktif yang terdapat dalam ekstrak biji *Trigonella foenum-graecum* dapat bertindak sebagai agen pengurangi atau stabilisator untuk membantu dalam pembentukan nanopartikel.

- (f). Karakterisasi dan Pemurnian: Setelah sintesis selesai, nanopartikel TiO<sub>2</sub> yang terbentuk dikarakterisasi menggunakan metode analitik seperti difraksi sinar-X (XRD), mikroskopi transmisi elektron (TEM), atau spektroskopi UV-Vis untuk menentukan ukuran, morfologi, dan sifat fisikokimia lainnya. Jika diperlukan, nanopartikel dapat dimurnikan menggunakan teknik seperti sentrifugasi atau dialisis untuk menghilangkan kotoran atau zat kontaminan.

Sintesis hijau nanopartikel TiO<sub>2</sub> dengan ekstrak biji *Trigonella foenum-graecum* menggabungkan manfaat bahan alami yang berkelanjutan dengan potensi aktivitas bioaktif yang terkandung dalam ekstrak.

### 3.3. Sintesis Nanopartikel TiO<sub>2</sub> dengan *Moringa Oleifera* Leaf Extract

Green synthesis atau sintesis hijau dari nanopartikel TiO<sub>2</sub> melibatkan penggunaan metode yang ramah lingkungan dan berkelanjutan untuk menghasilkan nanopartikel titanium dioksida. Ekstrak daun *Moringa Oleifera* dapat digunakan sebagai prekursor dalam sintesis hijau ini. Berikut adalah penjelasan umum tentang bagaimana green synthesis TiO<sub>2</sub> nanopartikel dapat dilakukan menggunakan ekstrak daun *Moringa Oleifera* (Pushpamalini et al., 2021; Sivaranjani and Philominathan, 2016):

- (a). Pengumpulan Daun *Moringa Oleifera*: Daun *Moringa Oleifera* dikumpulkan dan dibersihkan untuk menghilangkan kotoran atau kontaminan.
- (b). Persiapan Ekstrak: Daun yang dikumpulkan kemudian dihaluskan atau dihancurkan untuk meningkatkan luas permukaan dan memudahkan ekstraksi senyawa aktif. Ekstraksi dapat dilakukan dengan menggunakan pelarut seperti air atau pelarut organik seperti etanol atau metanol. Daun yang dihancurkan direndam dalam pelarut yang sesuai untuk waktu tertentu.
- (c). Filtrasi dan Konsentrasi: Setelah proses perendaman, ekstrak daun *Moringa Oleifera* yang terbentuk difiltrasi untuk memisahkan bagian padat atau serpihan tanaman. Ekstrak yang dihasilkan kemudian dapat dikonsentrasikan dengan menggunakan teknik evaporasi atau pemekatan lainnya untuk mendapatkan larutan yang lebih pekat.
- (d). Sintesis Nanopartikel TiO<sub>2</sub>: Ekstrak daun *Moringa Oleifera* yang telah dikonsentrasikan digunakan sebagai prekursor dalam sintesis nanopartikel TiO<sub>2</sub>. Prekursor ini dicampur dengan senyawa titanium yang biasanya merupakan senyawa titanium organik atau senyawa anorganik, seperti *titanium tetrakisoksid* (TTIP), dalam larutan pelarut yang sesuai.
- (e). Reaksi dan Pembentukan Nanopartikel: Campuran reaksi dari prekursor ekstrak daun *Moringa Oleifera* dan senyawa titanium diolah pada suhu dan waktu tertentu. Reaksi ini memicu pembentukan dan pertumbuhan nanopartikel TiO<sub>2</sub>. Komponen bioaktif yang terdapat dalam ekstrak daun *Moringa Oleifera* dapat bertindak sebagai agen pengurangi atau stabilisator untuk membantu dalam pembentukan nanopartikel.
- (f). Karakterisasi dan Pemurnian: Setelah sintesis selesai, nanopartikel TiO<sub>2</sub> yang terbentuk dikarakterisasi menggunakan metode analitik seperti difraksi sinar-X (XRD), mikroskopi transmisi elektron (TEM), atau spektroskopi UV-Vis untuk menentukan ukuran, morfologi, dan sifat fisikokimia lainnya. Jika diperlukan, nanopartikel dapat dimurnikan menggunakan teknik seperti sentrifugasi atau dialisis untuk menghilangkan kotoran atau zat-zat kontaminan.

Sintesis hijau nanopartikel TiO<sub>2</sub> dengan ekstrak daun *Moringa Oleifera* menggabungkan manfaat bahan alami yang berkelanjutan dengan potensi aktivitas bioaktif yang terkandung dalam ekstrak tersebut. Namun, perlu dicatat bahwa parameter sintesis dan metode yang digunakan.

### 3.4. Sintesis Nanopartikel TiO<sub>2</sub> dengan *Sesbania grandiflora*

Green synthesis atau sintesis hijau dari nanopartikel TiO<sub>2</sub> melibatkan penggunaan metode ramah lingkungan dan berkelanjutan untuk menghasilkan nanopartikel titanium dioksida. *Sesbania grandiflora*, yang juga dikenal sebagai bunga kacang polong atau agati, adalah tanaman yang dapat digunakan untuk ekstraksi senyawa bioaktif. Berikut adalah penjelasan umum tentang bagaimana sintesis hijau nanopartikel

TiO<sub>2</sub> dapat dicapai menggunakan ekstraksi *Sesbania grandiflora* (Jadoun et al., 2021; Nabi et al., 2021; Srinivasan et al., 2019):

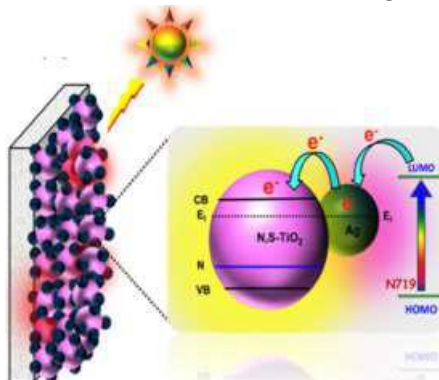
- Pengumpulan *Sesbania grandiflora*: Daun atau bagian tanaman *Sesbania grandiflora* dikumpulkan dan dibersihkan untuk menghilangkan kotoran atau kontaminan.
- Persiapan ekstrak: Bahan tanaman yang dikumpulkan digiling atau dihancurkan untuk meningkatkan luas permukaan dan kemudian diekstraksi menggunakan pelarut yang sesuai, seperti air atau etanol. Ekstraksi dapat dilakukan melalui berbagai metode seperti maserasi, sonikasi, atau refluks, tergantung pada senyawa yang diinginkan.
- Filtrasi dan konsentrasi: Ekstrak yang dihasilkan difiltrasi untuk menghilangkan sisa padat atau serpihan tanaman. Jika perlu, ekstrak dapat dikonsentrasikan menggunakan teknik seperti penguapan atau evaporasi rotari untuk mendapatkan larutan yang lebih pekat.
- Sintesis nanopartikel TiO<sub>2</sub>: Larutan *Sesbania grandiflora* yang diekstraksi kemudian digunakan sebagai prekursor untuk sintesis nanopartikel TiO<sub>2</sub>. Nanopartikel titanium dioksida dapat disintesis dengan berbagai metode, termasuk sintesis hidrotermal, sol-gel, atau bantuan microwave. Ekstrak *Sesbania grandiflora* ditambahkan ke campuran reaksi bersama dengan senyawa prekursor titanium, yang dapat berupa garam titanium atau senyawa organometalik.
- Reaksi dan pembentukan nanopartikel: Campuran reaksi tersebut dijaga pada kondisi reaksi yang sesuai, seperti suhu, pH, dan waktu, untuk mempromosikan pembentukan dan pertumbuhan nanopartikel TiO<sub>2</sub>. Keberadaan senyawa bioaktif dari ekstrak *Sesbania grandiflora* dapat bertindak sebagai agen reduksi atau stabilisasi, membantu dalam pembentukan nanopartikel.
- Karakterisasi dan pemurnian: Setelah sintesis selesai, nanopartikel TiO<sub>2</sub> yang dihasilkan dikarakterisasi menggunakan berbagai teknik analitik seperti difraksi sinar-X (XRD), mikroskopi transmisi elektron (TEM), atau spektroskopi UV-Vis untuk menentukan ukuran, morfologi, dan sifat lainnya. Jika diperlukan, nanopartikel dapat dimurnikan melalui teknik seperti sentrifugasi atau dialisis untuk menghilangkan kotoran.

Sintesis hijau nanopartikel TiO<sub>2</sub> menggunakan ekstraksi *Sesbania grandiflora* menawarkan keuntungan penggunaan sumber daya alami dan terbarukan, mengurangi penggunaan bahan kimia berbahaya, dan potensial menggabungkan senyawa.

#### IV. APLIKASI NANOPARTIKEL TiO<sub>2</sub> UNTUK DSSC

##### 4.1. Foto Anoda TiO<sub>2</sub> Nanopartikel

Dalam DSSC yang ditingkatkan dengan logam mulia, terjadi skema transfer elektron yang berbeda. Saat cahaya mengenai DSSC, molekul pewarna (N719) terabsorpsi dan mengalami eksitasi foton. Elektron yang tereksitasi bergerak ke pita konduksi dari nanokomposit N,S-TiO<sub>2</sub>. Molekul pewarna teroksidasi menerima elektron dari elektrolit melalui reaksi redoks dan kemudian diregenerasi. Elektrolit juga diregenerasi melalui elektroda platinum oleh aliran elektron melalui rangkaian eksternal (Karim et al., 2019b).



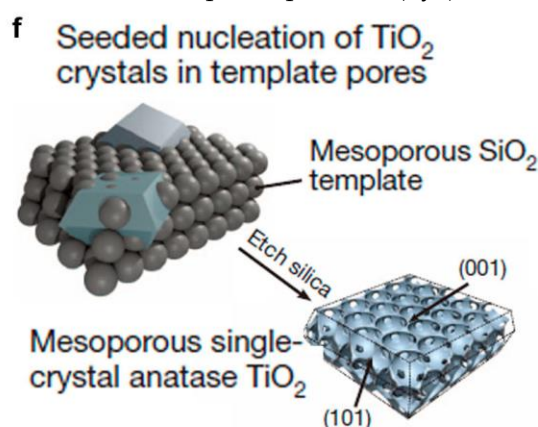
**Gambar 4.** Proses transfer fotoinduksi pada fotoanoda yang ditambahkan logam mulia (Lim et al., 2015)

Pengendapan Ag ke permukaan N,S-TiO<sub>2</sub> memiliki peran ganda. Selain bertindak sebagai elektron pengisian muatan, Ag juga digunakan sebagai elemen penghambur dalam hamburan plasmonik untuk menangkap cahaya dari molekul pewarna. Hal ini meningkatkan penyerapan foton oleh pewarna dan menghasilkan peningkatan yang signifikan dalam arus foton. Elektron dalam pita konduksi TiO<sub>2</sub> efektif ditangkap oleh Ag dan membantu mengurangi proses rekombinasi, yang pada akhirnya meningkatkan kinerja DSSC. Penggunaan nanopartikel Ag juga berhasil mengurangi band gap, membantu menggeser absorpsi ke wilayah cahaya tampak, dan efektif dalam meminimalkan proses rekombinasi elektron. (Lim et al., 2015).

#### 4.2. Cara Kerja DSSC berbasis TiO<sub>2</sub> Nanopartikel

TiO<sub>2</sub> adalah senyawa yang terdiri dari titanium dan oksigen, dan secara fisik berbentuk serbuk putih. Secara alami, TiO<sub>2</sub> memiliki tiga fasa, yaitu rutil, anatase, dan brookite, yang ditunjukkan oleh struktur kristalnya. Fasa rutil merupakan fasa yang paling umum, dan dapat disintesis dari mineral ilmenit melalui proses Becher. Dalam proses Becher, oksida besi yang terkandung dalam ilmenit dipisahkan dengan suhu tinggi dan bantuan gas sulfat atau klorida, menghasilkan TiO<sub>2</sub> rutil dengan kemurnian sekitar 91-93%. TiO<sub>2</sub> fase anatase umumnya stabil pada ukuran partikel kurang dari 11 nm, sedangkan fasa brookite pada ukuran partikel 11-35 nm, dan fasa rutil di atas 35 nm. TiO<sub>2</sub> atau titania adalah material semikonduktor tipe-n yang memiliki band gap energi sebesar 3,2 eV dan menyerap sinar ultraviolet. Material ini memiliki sifat fotokimia dan fotoelektrokimia yang baik, serta tidak beracun. Dalam aplikasi DSSC, TiO<sub>2</sub> yang digunakan biasanya memiliki fase anatase. Banyak penelitian saat ini yang menggunakan TiO<sub>2</sub> fase anatase karena memiliki kemampuan fotoaktif yang tinggi (Gratzel 2003, Maddu 2010).

Kemampuan fotoaktif yang tinggi berarti bahwa material tersebut mampu menyerap cahaya dengan baik. TiO<sub>2</sub> hanya menyerap cahaya dengan panjang gelombang di bawah 400 nm, sehingga sebagian besar spektrum cahaya lainnya akan tersedia untuk diserap oleh pewarna (dye).



**Gambar 5.** Skema gambar mikroskop elektron dari nukleasi kristal tunggal mesopori dan pertumbuhan dalam templat mesopori (Crossland et al., 2013)

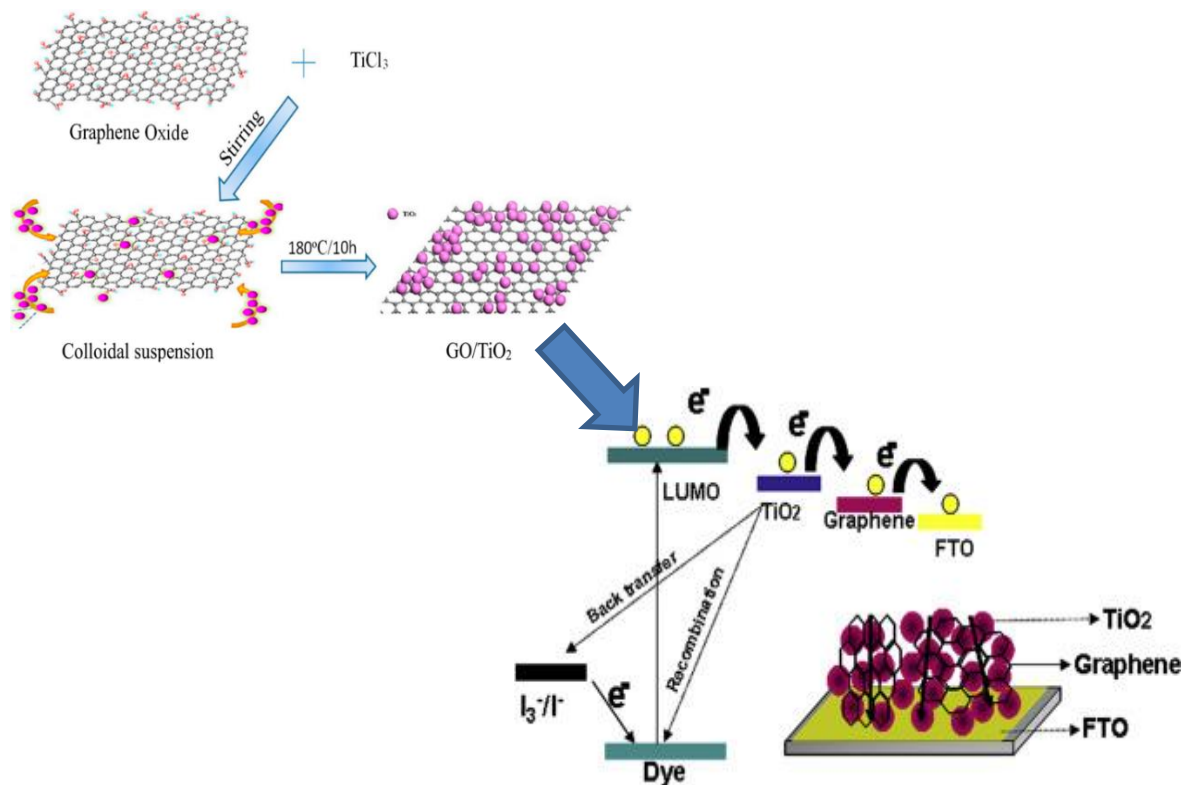
#### 4.3. Mekanisme Kerja DSSC: Nanopartikel TiO<sub>2</sub>-G

Sintesis TiO<sub>2</sub>/GO (Titanium Dioxide/Graphene Oxide) untuk aplikasi Dye-Sensitized Solar Cells (DSSC) melibatkan penggabungan nanopartikel TiO<sub>2</sub> dengan oksida grafit (GO) untuk meningkatkan kinerja sel surya berbasis pewarna. Berikut adalah penjelasan langkah-langkah sintesis TiO<sub>2</sub>/GO untuk aplikasi DSSC (Lin et al., 2020; Zhu et al., 2014):

- (a). Persiapan larutan TiO<sub>2</sub>: Larutan TiO<sub>2</sub> disiapkan dengan menggunakan prekursor titanium, seperti titanium isopropoksida, dan larutan pelarut yang sesuai. Langkah ini melibatkan pereaksi kimia dan

- kondisi reaksi yang terkontrol untuk memastikan pembentukan TiO<sub>2</sub> dengan ukuran partikel yang diinginkan.
- Sintesis oksida grafit (GO): Oksida grafit (GO) disiapkan melalui oksidasi grafit menggunakan bahan kimia oksidasi seperti asam nitrat dan asam sulfurat. Proses ini menghasilkan lapisan tipis oksida pada permukaan grafit, mengubahnya menjadi GO yang memiliki gugus oksigen yang terikat.
  - Pemisahan GO: GO yang dihasilkan dipisahkan dari larutan dan dibersihkan untuk menghilangkan bahan kimia oksidasi. Kemudian, GO dikembangkan menjadi lapisan tipis atau larutan yang pekat dengan bantuan pelarut yang sesuai. Hal ini bertujuan untuk mempermudah pencampuran GO dengan larutan TiO<sub>2</sub>.
  - Pencampuran TiO<sub>2</sub> dan GO: Larutan atau suspensi GO yang telah dibersihkan dicampurkan dengan larutan TiO<sub>2</sub>. Proses pencampuran dapat melibatkan teknik pengadukan atau sonikasi untuk memastikan dispersi yang merata dan interaksi yang baik antara TiO<sub>2</sub> dan GO.
  - Deposisi dan pengeringan: Campuran TiO<sub>2</sub>/GO yang telah dicampurkan diendapkan atau diaplikasikan pada substrat yang sesuai, seperti kaca, ITO (Indium Tin Oxide), atau FTO (Fluorine-doped Tin Oxide). Setelah itu, substrat yang dilapisi TiO<sub>2</sub>/GO dikeringkan menggunakan metode seperti pemanasan atau pengeringan alami.
  - Karakterisasi dan pengujian: Lapisan TiO<sub>2</sub>/GO yang dihasilkan kemudian dikarakterisasi menggunakan teknik analisis seperti mikroskopi elektron, spektroskopi, dan pengukuran struktur. Setelah itu, substrat yang telah diolah dapat digunakan untuk membangun sel surya DSSC dengan menambahkan pewarna sensitif pada lapisan TiO<sub>2</sub> dan melengkapi struktur sel dengan elektroda dan elektrolit yang sesuai.

Sintesis TiO<sub>2</sub>/GO dalam aplikasi DSSC menggabungkan keunggulan TiO<sub>2</sub> sebagai fotokatalis dengan konduktivitas yang tinggi dari GO. Kombinasi ini memungkinkan efisiensi transfer muatan yang lebih baik dan peningkatan kinerja sel surya DSSC.



**Gambar 6.** Mekanisme kerja DSSC: TiO<sub>2</sub>-Grafen Nanomaterial  
(Lin et al., 2020; Zhu et al., 2014)

Sintesis GO dilakukan dengan menggunakan metode modifikasi Hummers dengan serbuk grafit sebagai bahan mentah sesuai dengan proses yang dijelaskan dalam pekerjaan sebelumnya. GO yang disintesis didispersikan dalam 50 mL H<sub>2</sub>O dengan perlakuan ultrasonik di bawah kondisi ambien untuk menghasilkan dispersi GO berwarna coklat. Komposit GO/TiO<sub>2</sub> dibuat dengan metode reaksi hidrotermal. Prosedur konkret adalah sebagai berikut. Pertama, larutan titanium tetraklorida (TiCl<sub>3</sub>) (25-30%, 4 mL) ditambahkan ke dalam labu leher tiga, dan kemudian larutan NH<sub>3</sub>·H<sub>2</sub>O (37%, 5 mL) ditambahkan tetes demi tetes ke dalam larutan TiCl<sub>3</sub> dengan pengadukan yang kuat pada suhu ambien untuk mendapatkan larutan keruh. Selanjutnya, dispersi GO (100 mg/L, 100 mL) ditambahkan dengan cepat ke dalam larutan di atas untuk diaduk selama 30 menit. Kemudian, campuran dimasukkan ke dalam reaktor hidrotermal pada suhu 180°C selama 6 jam. Akhirnya, produk difiltrasi dan dicuci beberapa kali dengan air deionisasi dan dikeringkan pada suhu 80°C untuk memperoleh komposit GO/TiO<sub>2</sub>. Proses persiapan untuk nanokomposit GO/TiO<sub>2</sub> ditampilkan pada Gambar 6. selanjutnya Nanokomposit grafit-TiO<sub>2</sub> telah disiapkan dengan mencampur oksida grafit (GO) dan tetra-n-butyl titanat (TBT) diikuti oleh proses hidrotermal mudah di mana reduksi GO menjadi oksida grafit tereduksi (RGO) dan hidrolisis TBT menjadi TiO<sub>2</sub> terjadi. Karakterisasi nanostruktur grafit-TiO<sub>2</sub> diteliti secara detail dengan difraksi sinar-X, mikroskopi elektron pemindaian, mikroskopi transmisi, dan spektroskopi Raman. Sel surya sensitif zat warna (DSSC) berbasis fotoelektroda nanokomposit grafit-TiO<sub>2</sub> menunjukkan efisiensi konversi energi yang tinggi sebesar 4,28%, dibandingkan dengan DSSC berbasis fotoelektroda TiO<sub>2</sub> murni (3,11%), disertai dengan peningkatan kepadatan arus fotolistrik sirkuit pendek dan tegangan sirkuit terbuka. Peningkatan yang signifikan dalam kinerja DSSC diselidiki melalui spektroskopi fotovoltase termodulasi intensitas, spektroskopi fotokurent termodulasi intensitas, dan spektroskopi impedansi elektrokimia. Ditemukan bahwa penyatuan lembaran nano grafit dua dimensi dalam elektroda TiO<sub>2</sub> adalah faktor kunci yang menyebabkan kemampuan transfer elektron yang dihasilkan oleh sinar matahari yang lebih baik dan rekomendasi muatan yang lebih rendah (Subhapriya and Gomathipriya, 2018).

Dalam *Dye-Sensitized Solar Cells* (DSSC) berbasis TiO<sub>2</sub>/Graphene, proses eksitasi dan rekombinasi Dye-LUMO (Lowest Unoccupied Molecular Orbital) terjadi dalam mekanisme konversi energi cahaya menjadi energi listrik. Berikut adalah penjelasan tentang proses eksitasi dan rekombinasi Dye-LUMO dalam DSSC TiO<sub>2</sub>/Graphene (lihat Gambar 6b): (1) Eksitasi: Pada tahap eksitasi, cahaya jatuh ke lapisan sensitif pewarna (Dye) yang terletak di atas lapisan TiO<sub>2</sub>/Graphene. Pewarna ini biasanya merupakan senyawa organik yang dapat menyerap cahaya dengan efisiensi tinggi. Ketika molekul pewarna menyerap foton cahaya, elektron dalam molekul tersebut terangkat dari keadaan dasar (ground state) ke tingkat energi yang lebih tinggi, yaitu LUMO. (2) Transfer elektron: Setelah eksitasi, elektron yang terangkat ke LUMO molekul pewarna akan ditransfer ke lapisan TiO<sub>2</sub>/Graphene melalui permukaan kontak antara Dye dan TiO<sub>2</sub>/Graphene. TiO<sub>2</sub> berfungsi sebagai elektroda semikonduktor yang menerima elektron tersebut. Pada saat yang sama, dalam molekul pewarna yang kehilangan elektron, muncul lubang (hole) di tempat yang ditinggalkan oleh elektron yang tertransfer. (3) Rekombinasi Dye-LUMO: Tahap rekombinasi terjadi ketika elektron yang ditransfer ke TiO<sub>2</sub>/Graphene berpindah kembali ke molekul pewarna. Proses ini melibatkan difusi elektron melalui lapisan TiO<sub>2</sub>/Graphene dan reaksi dengan lubang yang terbentuk dalam molekul pewarna. Rekombinasi Dye-LUMO ini mengarah pada hilangnya energi yang dihasilkan dari eksitasi awal, sehingga mengurangi efisiensi sel surya. Untuk meningkatkan efisiensi DSSC, langkah-langkah yang diambil adalah: (a) Desain pewarna yang optimal: Pewarna sensitif cahaya yang dipilih harus memiliki efisiensi penyerapan cahaya yang tinggi dan efisiensi transfer elektron yang baik, sehingga mengurangi rekombinasi Dye-LUMO. (b) Penggunaan TiO<sub>2</sub>/Graphene: Penambahan lapisan graphene pada TiO<sub>2</sub> dapat meningkatkan konduktivitas elektronik dan memfasilitasi transfer elektron yang lebih cepat, sehingga mengurangi rekombinasi Dye-LUMO. (c) Elektrolit: Pilihan elektrolit yang tepat dapat membantu mencegah atau mengurangi rekombinasi Dye-LUMO. Elektrolit ini dapat memberikan perlindungan terhadap reaksi rekombinasi dengan mempertahankan konsentrasi elektron dan lubang yang terpisah. (d) Dalam keseluruhan, penanganan yang tepat terhadap proses eksitasi



dan rekombinasi Dye-LUMO dalam DSSC TiO<sub>2</sub>/Graphene dapat meningkatkan efisiensi konversi energi cahaya menjadi energi listrik dalam sel surya tersebut (Subhapriya and Gomathipriya, 2018).

## V. PENUTUPAN

### 5.1. Kesimpulan

Dengan penduduk yang kian meningkat mengartikan semakin besar pula kebutuhan energi secara terus-menerus. Sehingga, digunakannya TiO<sub>2</sub> sebagai terobosan energi surya generasi baru yang aman digunakan dan tidak merusak lingkungan karena berbahan organik. Melalui riset ini peneliti telah menyatakan TiO<sub>2</sub> menjadi material sel surya pewarna DSSC sensitizier dengan menggunakan ekstrak daun, buah dan berbagai tanaman obat-obatan yang memiliki nilai bahan dan stabilitas kimia yang tinggi dan stabil secara fisis maupun kimia yang diestrak langsung untuk sintesis nanopartikel melalui fotoanoda. Karena penggunaan DSSC eningkat 7% menjadikan terjadinya kemudahan proses fabrikasi menjadikan TiO<sub>2</sub> menjadi sasaran yang baik bagi DSSC. Dalam aplikasi DSSC fase anatase memiliki fotoaktif yang tinggi dibandingkan GO sehingga penyerapan cahaya oleh pewarna dye mengalami efesiensi transfer muatan yang lebih baik dalam kinerja sel surya DSSC Sehingga penggunaan nanopartikel TiO<sub>2</sub> menjadi pilihan yang baik karena aman digunakan dan tidak merusak lingkungan serta penggunaan DSSC mengurangi pemanasan global.

## DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad, M.Z., Alasiri, A.S., Ahmad, J., Alqahtani, A.A., Abdullah, M.M., Abdel-Wahab, B.A., Pathak, K., Saikia, R., Das, A., Sarma, H., Alzahrani, S.A., 2022. Green Synthesis of Titanium Dioxide Nanoparticles Using *Ocimum sanctum* Leaf Extract: In Vitro Characterization and Its Healing Efficacy in Diabetic Wounds. *Molecules* 27, 7712. <https://doi.org/10.3390/molecules27227712>
- Babar, F., Mehmood, U., Asghar, H., Mehdi, M.H., Khan, A.U.H., Khalid, H., Huda, N.U., Fatima, Z., 2020. Nanostructured photoanode materials and their deposition methods for efficient and economical third generation dye-sensitized solar cells: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 129, 109919. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109919>
- Boro, B., Gogoi, B., Rajbongshi, B.M., Ramchiary, A., 2018. Nano-structured TiO<sub>2</sub>/ZnO nanocomposite for dye-sensitized solar cells application: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 81, 2264-2270. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.035>
- Daniswara, A., Raydiska, G., Timotius, Y., 2020. Strategi Implementasi Dye Sensitized Solar Cell (DSSC) di Indonesia. *JO* 4. <https://doi.org/10.30588/jo.v4i2.835>
- Ghann, W., Sharma, V., Kang, H., Karim, F., Richards, B., Mobin, S.M., Uddin, J., Rahman, M.M., Hossain, F., Kabir, H., Uddin, N., 2019. The synthesis and characterization of carbon dots and their application in dye sensitized solar cell. *International Journal of Hydrogen Energy* 44, 14580-14587. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.04.072>
- Ghio, S., Bradanini, M.B., Garrido, M.M., Ontañon, O.M., Piccinni, F.E., Marrero Diaz De Villegas, R., Talia, P.M., Campos, E., 2020. Synergic activity of Cel8Pa  $\beta$ -1,4 endoglucanase and Bg1Pa  $\beta$ -glucosidase from *Paenibacillus xylanivorans* A59 in beta-glucan conversion. *Biotechnology Reports* 28, e00526. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2020.e00526>
- Huamán Aguirre, A.A., Salazar Salinas, K., Quintana Cáceda, M., 2021. Molecular interaction of natural dye based on *Zea Mays* and *Bixa Orellana* to nanocrystalline TiO<sub>2</sub> into dye sensitized solar cells. *J. Electrochem. Sci. Eng.* <https://doi.org/10.5599/jese.1014>

- Jadoun, S., Arif, R., Jangid, N.K., Meena, R.K., 2021. Green synthesis of nanoparticles using plant extracts: a review. *Environ Chem Lett* 19, 355–374. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01074-x>
- Karim, N.A., Mehmood, U., Zahid, H.F., Asif, T., 2019a. Nanostructured photoanode and counter electrode materials for efficient Dye-Sensitized Solar Cells (DSSCs). *Solar Energy* 185, 165–188. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.04.057>
- Karim, N.A., Mehmood, U., Zahid, H.F., Asif, T., 2019b. Nanostructured photoanode and counter electrode materials for efficient Dye-Sensitized Solar Cells (DSSCs). *Solar Energy* 185, 165–188. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.04.057>
- Karthick, S.N., Hemalatha, K.V., Suresh Kannan Balasingam, Manik Clinton, F., Akshaya, S., Kim, H., 2019. Dye-Sensitized Solar Cells: History, Components, Configuration, and Working Principle, in: Pandikumar, A., Jothivenkatachalam, K., Bhojanaa, K. (Eds.), *Interfacial Engineering in Functional Materials for Dye-Sensitized Solar Cells*. Wiley, pp. 1–16. <https://doi.org/10.1002/9781119557401.ch1>
- Khan, M.I., Sabir, M., Mustafa, G.M., Fatima, M., Mahmood, A., Abubshait, S.A., Abubshait, H.A., Iqbal, M., 2020. 300 keV cobalt ions irradiations effect on the structural, morphological, optical and photovoltaic properties of Zn doped TiO<sub>2</sub> thin films based dye sensitized solar cells. *Ceramics International* 46, 16813–16819. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.03.256>
- Kishore Kumar, D., Kříž, J., Bennett, N., Chen, B., Upadhayaya, H., Reddy, K.R., Sadhu, V., 2020. Functionalized metal oxide nanoparticles for efficient dye-sensitized solar cells (DSSCs): A review. *Materials Science for Energy Technologies* 3, 472–481. <https://doi.org/10.1016/j.mset.2020.03.003>
- Krisdiyanto, D., Khuzaiyah, S., UIN sunan kalijaga yogyakarta, Khamidinal, K., UIN sunan kalijaga yogyakarta, Sedyadi, E., UIN sunan kalijaga yogyakarta, 2015. Influence of Dye Adsorption Time on TiO<sub>2</sub> Dye-Sensitized Solar Cell with Krokot Extract (*Portulaca Oleracea*. L) as A Natural Sensitizer. *J. Pure App. Chem. Res.* 4, 17–24. <https://doi.org/10.21776/ub.jpacr.2015.004.01.203>
- Kumar, Y., Chhalodia, T., Bedi, P.K.G., Meena, P.L., 2023. Photoanode modified with nanostructures for efficiency enhancement in DSSC: a review. *Carbon Lett.* 33, 35–58. <https://doi.org/10.1007/s42823-022-00422-x>
- Lin, C., Gao, Y., Zhang, J., Xue, D., Fang, H., Tian, J., Zhou, C., Zhang, C., Li, Y., Li, H., 2020. GO/TiO<sub>2</sub> composites as a highly active photocatalyst for the degradation of methyl orange. *J. Mater. Res.* 35, 1307–1315. <https://doi.org/10.1557/jmr.2020.41>
- Maiagree, W., Lowpa, S., Towannang, M., Rutphonsan, P., Tangtrakarn, A., Pimanpang, S., Maiagree, 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>
- Maurya, I.C., Singh, S., Senapati, S., Srivastava, P., Bahadur, L., 2019. Green synthesis of TiO<sub>2</sub> nanoparticles using *Bixa orellana* seed extract and its application for solar cells. *Solar Energy* 194, 952–958. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.10.090>
- Mufidah, R.A., Khamidinal, K., Sedyadi, E., Krisdiyanto, D., 2015. Krokot (*Portulaca oleracea* L) As a Natural Sensitizer for TiO<sub>2</sub> Dye-sensitized Solar Cells: The Effect of Temperature Extract. *BIOMEDNATPROCH* 4, 25. <https://doi.org/10.14421/biomedich.2015.42.25-29>

- Nabi, G., Majid, A., Riaz, A., Alharbi, T., Arshad Kamran, M., Al-Habardi, M., 2021. Green synthesis of spherical TiO<sub>2</sub> nanoparticles using Citrus Limetta extract: Excellent photocatalytic water decontamination agent for RhB dye. *Inorganic Chemistry Communications* 129, 108618. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2021.108618>
- Patil, S.P., 2020. Ficus carica assisted green synthesis of metal nanoparticles: A mini review. *Biotechnology Reports* 28, e00569. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2020.e00569>
- Pushpamalini, T., Keerthana, M., Sangavi, R., Nagaraj, A., Kamaraj, P., 2021. Comparative analysis of green synthesis of TiO<sub>2</sub> nanoparticles using four different leaf extract. *Materials Today: Proceedings* 40, S180-S184. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.438>
- Raj, C.C., Prasanth, R., 2016. A critical review of recent developments in nanomaterials for photoelectrodes in dye sensitized solar cells. *Journal of Power Sources* 317, 120-132. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.03.016>
- Riadi, Y., Geesi, M.H., Dehbi, O., Ouerghi, O., 2022. Photocatalytic Synthesis of Quinazolinone Derivatives as Mediated by Titanium Dioxide (TiO<sub>2</sub>) Nanoparticles Greenly Synthesised via *Citrus limon* Juice. *Polycyclic Aromatic Compounds* 1-13. <https://doi.org/10.1080/10406638.2022.2144908>
- Sedghi, R., Heidari, F., 2016. A novel & effective visible light-driven TiO<sub>2</sub> /magnetic porous graphene oxide nanocomposite for the degradation of dye pollutants. *RSC Adv.* 6, 49459-49468. <https://doi.org/10.1039/C6RA02827F>
- Semalti, P., Sharma, S.N., 2020. Dye Sensitized Solar Cells (DSSCs) Electrolytes and Natural Photo-Sensitizers: A Review. *J nanosci nanotechnol* 20, 3647-3658. <https://doi.org/10.1166/jnn.2020.17530>
- Sengupta, D., Das, P., Mondal, B., Mukherjee, K., 2016. Effects of doping, morphology and film-thickness of photo-anode materials for dye sensitized solar cell application - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 60, 356-376. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.104>
- Sharma, K., Sharma, V., Sharma, S.S., 2018. Dye-Sensitized Solar Cells: Fundamentals and Current Status. *Nanoscale Res Lett* 13, 381. <https://doi.org/10.1186/s11671-018-2760-6>
- Singh, S., Maurya, I.C., Tiwari, A., Srivastava, P., Bahadur, L., 2022. Green synthesis of TiO<sub>2</sub> nanoparticles using Citrus limon juice extract as a bio-capping agent for enhanced performance of dye-sensitized solar cells. *Surfaces and Interfaces* 28, 101652. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2021.101652>
- Sivaranjani, V., Philominathan, P., 2016. Synthesize of Titanium dioxide nanoparticles using Moringa oleifera leaves and evaluation of wound healing activity. *Wound Medicine* 12, 1-5. <https://doi.org/10.1016/j.wndm.2015.11.002>
- 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<sub>2</sub> 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>
- Subhapiya, S., Gomathipriya, P., 2018. Green synthesis of titanium dioxide (TiO<sub>2</sub>) nanoparticles by *Trigonella foenum-graecum* extract and its antimicrobial properties. *Microbial Pathogenesis* 116, 215-220. <https://doi.org/10.1016/j.micpath.2018.01.027>

- UIN sunan kalijaga yogyakarta, Krisdiyanto, D., Khuzaifah, S., UIN sunan kalijaga yogyakarta, Khamidinal, K., UIN sunan kalijaga yogyakarta, Sedyadi, E., UIN sunan kalijaga yogyakarta, 2015. Influence of Dye Adsorbtion Time on TiO<sub>2</sub> Dye-Sensitized Solar Cell with Krokot Extract (*Portulaca Oleracea. L*) as A Natural Sensitizer. *J. Pure App. Chem. Res.* 4, 17-24. <https://doi.org/10.21776/ub.jpacr.2015.004.01.203>
- Vembu, S., Vijayakumar, S., Nilavukkarasi, M., Vidhya, E., Punitha, V.N., 2022. Phytosynthesis of TiO<sub>2</sub> nanoparticles in diverse applications: What is the exact mechanism of action? *Sensors International* 3, 100161. <https://doi.org/10.1016/j.sintl.2022.100161>
- Zhu, M., Li, X., Liu, W., Cui, Y., 2014. An investigation on the photoelectrochemical properties of dye-sensitized solar cells based on graphene-TiO<sub>2</sub> composite photoanodes. *Journal of Power Sources* 262, 349-355. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.04.001>