p-ISSN : 2302-4216
e-ISSN : 2830-1765
Inovasi Fisika Indonesia
https://ejournal.unesa.ac.id/index.php/inovasi-fisika-indonesia
Published by: Program Studi Fisika Jurusan Fisika FMIPA Universitas Negeri Surabaya
Kampus Unesa Ketintang Jl. Ketintang Gd. C3 Lt. 1 Surabaya - Indonesia
jifi@unesa.ac.id

Jurnal Inovasi Fisika Indonesia (IFI) Volume 15 Nomor 2 Tahun 2026, hal 317-326

REVIEW: *GREEN SYNTHESIS* TiO_2 *ALOE VERA* SEBAGAI MODIFIKASI FOTOANODA PADA *DYE-SENSITIZED SOLAR CELL* (DSSC)

[1)]Anis Safaatul Rohmah, [2)]Adawiyyah Nuurul Aini, [3)]Galuh Aryseno, [4)]Adinda Priskia Cahya Putri, [5)]Muhammad Hoiron, [6)] Evi Suaebah, [7)] Ersyzario Edo Yunata

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

Abstrak

Green synthesis TiO_2 menggunakan ekstrak *Aloe vera* merupakan pendekatan ramah lingkungan yang mampu menghasilkan nanopartikel dengan ukuran kecil, porositas tinggi, dan kristalinitas anatase yang baik. Artikel review ini membahas berbagai penelitian terkait sintesis TiO_2–*Aloe vera*, karakterisasi material, serta aplikasinya sebagai fotoanoda dalam *Dye-Sensitized Solar Cell* (DSSC). Hasil analisis menunjukkan bahwa perbedaan metode sintesis, seperti solvotermal, sol gel, hidrotermal, dan biosintesis, memberikan pengaruh signifikan terhadap ukuran partikel, nilai band gap, dan efisiensi DSSC. Metode solvotermal terbukti memberikan performa tertinggi, diikuti metode sol-gel dan hidrotermal, sementara biosintesis tetap memberikan peningkatan meskipun kontrol morfologinya terbatas. Secara keseluruhan, komposit TiO_2–*Aloe vera* mampu meningkatkan adsorpsi dye, menurunkan rekombinasi elektron, dan meningkatkan parameter fotovoltaik DSSC. Review ini menegaskan potensi TiO_2–*Aloe vera* sebagai material fotoanoda berbiaya rendah dan ramah lingkungan, sekaligus menunjukkan perlunya optimasi lebih lanjut untuk meningkatkan stabilitas dan konsistensi kinerjanya.

Kata Kunci: Sintesis Hijau, TiO_2-*Aloe vera*, DSSC, Fotoanoda

Abstract

Green synthesis of TiO_2 using Aloe vera extract is an environmentally friendly approach that produces nanoparticles with small sizes, high porosity, and well-defined anatase crystallinity. This review article discusses various studies on the synthesis of TiO_2–Aloe vera, material characterization, and its application as a photoanode in Dye-Sensitized Solar Cells (DSSC). Comparative analysis shows that different synthesis methods such as solvothermal, sol-gel, hydrothermal, and direct biosynthesis – significantly influence particle size, band gap, and DSSC efficiency. The solvothermal method provides the best performance, followed by sol-gel and hydrothermal methods, while biosynthesis still offers notable improvements despite its limited morphological control. Overall, TiO_2–Aloe vera composites enhance dye adsorption, suppress electron recombination, and improve the photovoltaic parameters of DSSC. This review highlights the potential of TiO_2–Aloe vera as a low-cost and eco-friendly photoanode material, while emphasizing the need for further optimization to improve its stability and performance consistency.

***Keywords**: Green Synthesis, TiO_2-Aloe vera, DSSC, Photoanode*

p-ISSN : 2302-4216
e-ISSN : 2830-1765
Inovasi Fisika Indonesia
https://ejournal.unesa.ac.id/index.php/inovasi-fisika-indonesia
Published by:
Program Studi Fisika
Jurusan Fisika FMIPA
Universitas Negeri Surabaya
Kampus Unesa Ketintang Jl. Ketintang Gd. C3 Lt. 1
Surabaya - Indonesia
jifi@unesa.ac.id

I. PENDAHULUAN

Krisis energi global dan meningkatnya emisi karbon mendorong perkembangan teknologi energi terbarukan yang efisien, murah, dan ramah lingkungan. Menurut International Energy Agency (IEA 2025), permintaan listrik tumbuh lebih cepat daripada permintaan energi secara keseluruhan dan PDB meningkat sebesar 4,3% pada tahun 2024. Peningkatan absolut permintaan merupakan yang terbesar yang pernah tercatat (tidak termasuk lonjakan pada tahun-tahun ketika ekonomi global pulih dari resesi). Kebutuhan global akan energi bersih dan terbarukan telah mendorong penelitian intensif terhadap teknologi sel surya sebagai alternatif terhadap bahan bakar fosil. Kondisi tersebut semakin diperkuat oleh meningkatnya konsumsi listrik global, kekhawatiran terhadap pemanasan global, dan ketergantungan pada bahan bakar fosil. Salah satu teknologi yang dikembangkan adalah *Dye-Sensitized Solar Cell* (DSSC), yang menawarkan biaya produksi lebih rendah, fleksibilitas struktur, dan performa yang kompetitif dibanding sel surya silikon konvensional. Sejak 2014–2024, efisiensi DSSC komersial meningkat dari 7–9% menjadi 13–14%, terutama akibat peningkatan material fotoanoda berbasis TiO_2 dan pengembangan dye sensitizer organik. Berbagai studi menunjukkan bahwa DSSC merupakan salah satu teknologi fotovoltaik yang banyak diteliti karena proses preparasinya yang sederhana, biaya produksinya yang relatif rendah, serta kemudahan fabrikasinya dibandingkan teknologi sel surya konvensional berbasis silikon (Parvez et al., 2018). DSSC bekerja dengan prinsip fotosintesis buatan: cahaya diserap oleh *dye* yang kemudian tereksitasi dan melepaskan elektron ke semikonduktor seperti Titanium dioxide (TiO_2) yang berfungsi sebagai fotoanoda. Elektron kemudian bergerak menuju rangkaian eksternal, sedangkan dye yang teroksidasi direduksi kembali oleh elektrolit. Namun demikian, kinerja dan stabilitas DSSC sangat bergantung pada material semikonduktor yang digunakan pada fotoanoda dan di sinilah *Titanium dioxide* (TiO_2) memainkan peran sentral. Pilihannya menggunakan TiO_2 sebagai fotoanoda sangat dipengaruhi oleh karakteristik fisik dan kimianya: stabil secara fotokimia, mudah diperoleh, dan sudah banyak digunakan secara komersial. TiO_2 dikenal luas sebagai bahan fotoanoda karena kestabilan kimia, band gap yang sesuai, serta kemampuannya menyediakan permukaan luas untuk absorpsi pewarna dan transportasi muatan foton/elektron (Mustaghfiri dan Munasir., 2023). Selain itu, penelitian oleh Chouhan et al (2023) menunjukkan bahwa fase anatase dengan morfologi terkontrol mampu menurunkan laju rekombinasi dan meningkatkan mobilitas elektron sehingga memperbaiki performa keseluruhan DSSC.

Metode tradisional sintesis TiO_2 (misalnya sol-gel, hidrotermal, anatase/*rutile conversion*) meskipun efektif, seringkali memerlukan prekursor kimia beracun, pelarut organik, temperatur tinggi, dan proses yang menghasilkan limbah, aspek-aspek yang bertentangan dengan prinsip keberlanjutan dan ramah lingkungan. Oleh karena itu, dalam upaya menuju teknologi energi terbarukan yang benar-benar "bersih", pendekatan alternatif melalui green synthesis (sintesis hijau) menjadi sangat relevan. Metode ini menggunakan ekstrak tumbuhan sebagai agen reduksi dan penstabil, menggantikan bahan kimia sintetis berbahaya dan mengurangi jejak lingkungan dari produksi nanopartikel (Muhammad et al., 2025). Berbagai penelitian melaporkan bahwa teknik ini mampu menghasilkan TiO_2 dengan ukuran partikel kecil, morfologi seragam, serta sifat optik yang sesuai untuk aplikasi fotovoltaik maupun fotokatalitik (Ahmed et al., 2020; Ibrahim et al., 2021).

Ekstrak tumbuhan menawarkan berbagai biomolekul seperti flavonoid, tanin, polisakarida, terpenoid, dan senyawa organik lain yang dapat berfungsi sebagai reduktor dan agen penstabil memungkinkan pembentukan nanopartikel TiO_2 dengan ukuran partikel kecil, morfologi khas, dan permukaan aktif yang cocok untuk aplikasi optoelektronik maupun fotokatalitik (Yunusa et al., 2024). Sebagai contoh, dalam rangka penelitian fotokatalisis dan aplikasi lingkungan, banyak penelitian telah berhasil mensintesis TiO_2 melalui ekstrak tumbuhan (daun, kulit, buah) dan menunjukkan aktivitas tinggi dalam dekomposisi polutan, serta sifat fisikokimia yang memenuhi standar anatase TiO_2 (Okto & Munasir., 2023). Khususnya, tumbuhan seperti *Aloe vera* (syn. *Aloe barbadensis Miller*) banyak diidentifikasi memiliki senyawa bioaktif (polisakarida, flavonoid, fenolik) yang dapat berfungsi sebagai agen polimer atau capping dan hasilnya menunjukkan

potensi yang kuat untuk sintesis TiO_2 dan aplikasi fungsional seperti fotokatalisis maupun DSSC. Contoh studi menunjukkan bahwa TiO_2 yang disintesis dengan ekstrak *Aloe vera* mampu menunjukkan aktivitas fotokatalitik yang jauh lebih baik dibanding metode konvensional (Luca, 2024).

Meskipun memiliki potensi tersebut, literatur yang secara spesifik mengeksplorasi TiO_2 hasil *green synthesis* menggunakan *Aloe vera* sebagai fotoanoda DSSC masih relatif jarang dan belum sistematis. Beberapa tantangan utama muncul dari variabilitas prosedur, meliputi jenis dan bagian tumbuhan, konsentrasi ekstrak, rasio ekstrak terhadap prekursor, kondisi pH atau pelarut, hingga perlakuan pascasintesis, seperti sintering. Variasi tersebut dapat menghasilkan perbedaan pada ukuran partikel, luas permukaan, fase kristal, dan sifat elektronik sehingga menyulitkan perbandingan langsung antarstudi. Selain itu, sebagian besar literatur mengenai green-synthesized TiO_2 masih berfokus pada aplikasi fotokatalitik, seperti degradasi polutan organik, dibandingkan secara langsung pada aplikasi sel surya. Hal ini menunjukkan bahwa penerapan TiO_2 hasil green synthesis menggunakan *Aloe vera* sebagai fotoanoda DSSC masih memerlukan analisis dan optimalisasi tersendiri, terutama untuk memahami hubungan antara metode sintesis, karakteristik material, dan performa DSSC. Dengan demikian, artikel ini bertujuan untuk melakukan review komprehensif mengenai penggunaan *Aloe vera* sebagai agen dalam sintesis TiO_2 untuk modifikasi fotoanoda DSSC: mencakup landasan teori, metodologi sintesis terbaru, karakterisasi material, dampak modifikasi terhadap performa DSSC, tantangan yang dihadapi, dan rekomendasi untuk penelitian ke depan.

II. METODE

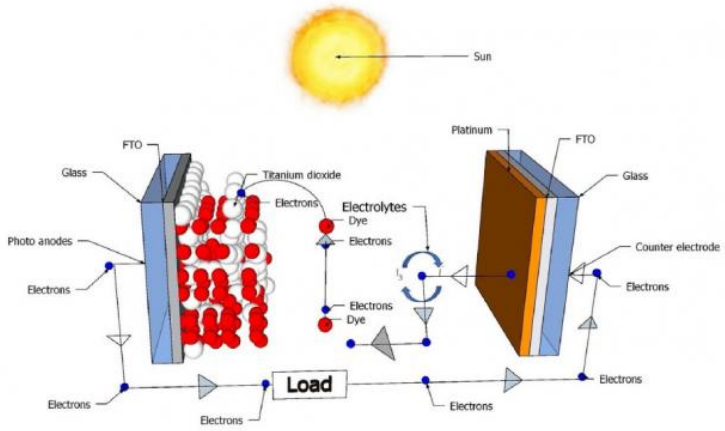
Untuk menyusun *review* ini, dilakukan penelusuran literatur melalui database seperti Google Scholar, ScienceDirect, dan perpustakaan universitas dengan kata kunci: "*TiO_2 green synthesis*", "*Aloe vera TiO_2*", "*DSSC TiO_2 nanoparticle*", "green synthesis dye-sensitized solar cell". Review ini memprioritaskan literatur yang diterbitkan pada periode 2020–2025. Namun, beberapa referensi yang lebih lama tetap digunakan apabila relevan sebagai landasan teori, informasi dasar, atau pembanding terhadap perkembangan penelitian terbaru. Proses seleksi dilakukan dengan mempertimbangkan kesesuaian judul dan abstrak dengan topik review, kemudian dilanjutkan dengan pemeriksaan isi artikel untuk memastikan kesesuaian terhadap fokus pembahasan. Kriteria inklusi meliputi artikel *peer-reviewed* berbahasa Inggris atau Indonesia yang membahas sintesis TiO_2 menggunakan ekstrak tumbuhan, khususnya *Aloe vera*, serta penerapannya pada DSSC atau sebagai material yang relevan untuk fotoanoda. Artikel yang tidak berkaitan dengan sintesis hijau TiO_2, menggunakan bahan berbahaya tanpa pendekatan *green synthesis*, atau membahas TiO_2 untuk aplikasi non-DSSC tanpa relevansi terhadap fotoanoda tidak diprioritaskan dalam analisis. Literatur yang memenuhi kriteria kemudian direkap berdasarkan metode sintesis, karakteristik material, dan performa aplikasinya pada DSSC untuk dianalisis secara komparatif dan kualitatif.

III. PEMBAHASAN

A. *Dye Sensitized Solar-Cell* Nanopartikel TiO_2

*Dye-Sensitized Solar Cell (*DSSC) merupakan generasi sel surya yang mengombinasikan prinsip fotovoltaik dan elektrokimia, di mana peran fotoanoda sangat krusial dalam menentukan efisiensi konversi energi. Dalam satu dekade terakhir, nanopartikel TiO_2 tetap menjadi material dominan untuk fotoanoda karena kestabilan kimia, ketersediaan melimpah, band gap yang sesuai untuk injeksi elektron dari pewarna, serta kemampuannya membentuk struktur berpori dengan luas permukaan besar sehingga mampu mengadsorpsi pewarna secara optimal. Saat pewarna menyerap foton, elektron tereksitasi menuju level LUMO dan segera diinjeksi ke pita konduksi TiO_2 sebelum dialirkan menuju elektroda FTO; proses ini sangat bergantung pada morfologi, fase kristal, dan rekayasa permukaan TiO_2. Penelitian terbaru melaporkan bahwa fase anatase memberikan performa terbaik dibanding rutile karena mobilitas elektron lebih tinggi dan laju rekombinasi yang lebih rendah, sehingga struktur anatase berukuran 10–30 nm dianggap ideal untuk memaksimalkan adsorpsi pewarna sekaligus menyediakan jalur transport elektron yang efisien dalam jaringan nanopartikel (Umale et al., 2017). Tren riset 2015–2025 juga menekankan pentingnya kontrol sintesis TiO_2, baik melalui metode sol–gel, hidrotermal, maupun teknik green synthesis menggunakan ekstrak

tanaman atau biomassa sebagai agen pereduksi dan penstabil. Metode ramah lingkungan ini tidak hanya mengurangi toksisitas proses, tetapi juga menghasilkan TiO_2 dengan morfologi unik dan gugus permukaan kaya oksigen yang meningkatkan interaksi dengan pewarna, sehingga meningkatkan densitas elektron terinjeksi dan menghambat rekombinasi (Sofyan et al., 2024).



Gambar 1. Komponen DSSC (Seithtanabutara. V et al, 2023)

Selain pengendalian ukuran dan kristalinitas, modifikasi permukaan menjadi fokus utama untuk meningkatkan efisiensi DSSC. Doping logam (misalnya Ag, Cu, Fe) dan komposit dengan karbon seperti graphene atau reduced graphene oxide (rGO) dilaporkan mampu memperluas serapan cahaya, menurunkan resistansi antarmuka, serta menyediakan jalur elektron yang lebih cepat sehingga meningkatkan arus foton (Jsc). Penambahan lapisan scattering berupa partikel TiO_2 berukuran besar juga terbukti meningkatkan panjang lintasan cahaya, menghasilkan peningkatan respons spektral IPCE pada panjang gelombang yang lebih besar, sebagaimana dilaporkan pada studi-studi 2020–2024. Selain itu, perlakuan pasca-fabrikasi seperti post-treatment $TiCl_4$ secara konsisten dilaporkan meningkatkan kepadatan elektron dan memperkuat ikatan pewarna–TiO_2, sehingga menghasilkan peningkatan Voc dan efisiensi keseluruhan. Secara keseluruhan, penelitian selama satu dekade terakhir menunjukkan bahwa kinerja DSSC sangat bergantung pada hubungan sinergis antara morfologi nanopartikel TiO_2, kondisi adsorpsi pewarna, modifikasi permukaan, serta strategi fabrikasi film fotoanoda. Meski efisiensi DSSC berbasis TiO_2 telah meningkat melalui rekayasa struktur dan teknik sintesis baru, tantangan utama yang tersisa meliputi stabilitas jangka panjang, kontrol rekombinasi pada antarmuka, dan reprodusibilitas sintesis *green synthesis* skala besar. Namun demikian, tren terbaru penggunaan TiO_2 hasil ekstrak nabati dan komposit *hybrid* menunjukkan arah menjanjikan untuk menghasilkan material fotoanoda yang lebih efisien, murah, dan ramah lingkungan, sehingga DSSC tetap menjadi kandidat kuat untuk teknologi energi surya berbiaya rendah di masa depan.

B. *Green Synthesis* Nanopartikel TiO_2-*Aloe Vera*

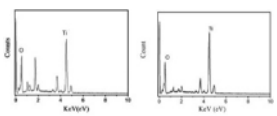
Aloe vera merupakan salah satu tumbuhan yang paling banyak diteliti dalam sintesis nanopartikel karena mengandung polisakarida, flavonoid, dan fenolik yang efektif sebagai agen reduksi dan capping dalam pembentukan TiO_2 berukuran nano (Prasad et al., 2018). Pendekatan green synthesis untuk produksi nanopartikel TiO_2 menggunakan ekstrak alami seperti dari *Aloe vera* telah muncul sebagai alternatif menarik dalam upaya mendapatkan TiO_2 yang ramah lingkungan, hemat energi, dan dengan potensi sifat fisik-kimia unggul. Dalam metode ini, biomolekul yang terkandung dalam ekstrak misalnya flavonoid, polifenol, polisakarida, atau senyawa organik lain berfungsi sebagai agen reduksi dan agen penstabil ("*capping agent*") terhadap prekursor titanium, menggantikan kebutuhan terhadap bahan kimia sintetis yang bersifat toksik. Sebuah studi terbaru menunjukkan bahwa ekstrak bagian luar daun *Aloe vera* (bukan hanya gel) dapat dipakai untuk mensintesis TiO_2 nanopartikel melalui jalur green synthesis, menghasilkan partikel berukuran rata-rata sekitar 10 ± 2 nm setelah kalsinasi, lebih kecil dibanding rute konvensional (~12 ± 3 nm), dan dengan morfologi

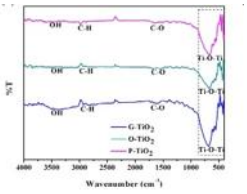
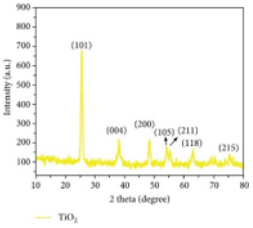
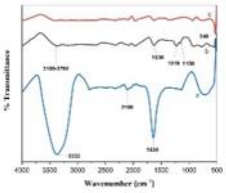
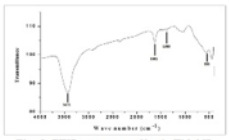
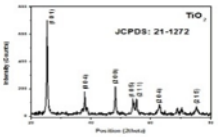
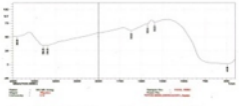
yang relatif konsisten (Luca et al. 2024). Beberapa penelitian bahkan melaporkan penggunaan ekstrak kulit/*rind Aloe vera* (ekstrak eksternal daun) untuk sintesis TiO_2: misalnya, sebuah penelitian menggunakan "*rind of Aloe vera extract*" sebagai *capping agent* dan berhasil memperoleh nanopartikel dengan fase anatase, luas permukaan dan volume pori meningkat, tanpa kehilangan morfologi sferis, sehingga menunjukkan potensi sebagai material efisien untuk aplikasi fotokatalis. Metode ini bersifat ramah lingkungan dan hemat biaya, karena ekstrak tanaman bisa diperoleh dari limbah industri kosmetik / farmasi menjadikan proses lebih berkelanjutan.

Dari segi karakterisasi, nanopartikel TiO_2 hasil green synthesis menggunakan *Aloe vera* menunjukkan sifat fisik-kimia yang memenuhi standar material TiO_2: fase kristal anatase, ukuran kristalit nano, dan struktur nanometer—ditunjukkan melalui teknik seperti *X-ray Diffraction* (XRD), *Transmission Electron Microscopy* (TEM) atau *Scanning Electron Microscopy* (SEM), serta analisis porositas dan luas permukaan (BET), serta analisis optik seperti UV-Vis (Mustaghfiri & Munasir, 2023). Hal ini membuktikan bahwa green synthesis bukan sekadar alternatif "ramah lingkungan", tetapi juga mampu menghasilkan material fungsional yang relevan untuk aplikasi teknis. Faktor-faktor penting dalam green synthesis dengan *Aloe vera* meliputi kondisi ekstraksi (bagian daun yang dipakai gel, kulit, atau *rind*; rasio ekstrak terhadap prekursor titanium), jenis prekursor titanium (misalnya titanium tetrachloride, titanium isopropoksida), pH larutan, suhu dan durasi reaksi, serta perlakuan pasca-sintesis seperti kalsinasi/annealing. Pada salah satu studi, variasi pH saat sintesis dilaporkan mempengaruhi struktur dan ukuran nanopartikel TiO_2 yang dihasilkan. Oleh karena itu, optimasi parameter tersebut menjadi kunci untuk menghasilkan nanopartikel dengan morfologi, ukuran, dan sifat permukaan yang bisa disesuaikan kebutuhan (fotokatalis, elektroda, dsb.). Keunggulan utama *TiO_2–Aloe vera hasil green synthesis*, dibandingkan metode konvensional, mencakup:

a) Produksi lebih ramah lingkungan mengurangi penggunaan bahan kimia keras dan pelarut organik.
b) Kesederhanaan prosedur; dengan kondisi reaksi yang umumnya lebih lembut (suhu relatif rendah, proses lebih sederhana) dibanding metode kimia berat.
c) Potensi biaya lebih rendah ekstrak *Aloe vera* dapat diperoleh dari limbah daun/daun luar.
d) Nanopartikel dengan ukuran kecil dan luas permukaan besar fitur kritis untuk aplikasi yang membutuhkan interaksi permukaan luas seperti fotokatalisis, adsorpsi, atau sebagai mediasi antarmuka di elektroda.
e) Kemungkinan integrasi ke aplikasi berkelanjutan dan "hijau", sejalan dengan tren material berwawasan lingkungan.

Tabel 1. Perbandingan Penelitian Terkait Green Synthesis TiO_2-*Aloe Vera* sebagai Fotoanoda DSSC

Judul Artikel	Bahan	Metode	Hasil	Sumber
Eco-Friendly TiO_2 Nanoparticles: Harnessing Aloe vera for Superior Photocatalytic Degradation of Methylene Blue	Ekstrak *Aloe vera*	Sol gel, kalsinasi 450°C	TiO_2-green memiliki luas permukaan BET sebesar 70,2 m²/g dan band gap sebesar 3,1 eV serta menunjukkan degradasi methylene blue sebesar 50 ± 3% setelah 180 menit penyinaran UV. 	De Luca, A., et al (224)
Synthesis of TiO_2 Nanostructures by Green Approach as Photoanodes for DSSC	*Aloe vera* & etanol	Hydrothermal 180°C	TiO_2 berfase anatase dengan morfologi menyerupai nanorod. Fase anatase dominan, efisiensi	Senthamarai, M.,et al(2021)

			DSSC meningkat dari 1.8% → 2.9% 	
A Comprehensive Study on Aloe vera Extract as Natural Capping Agent for TiO_2	*Aloe vera* gel	Sol gel	Nanopartikel 27 nm, stabilitas tinggi. 	Srujana, P., et al (2022)
Rind of Aloe vera (L.) Burm. f. extract for the synthesis of titanium dioxide nanoparticles.	Kulit *Aloe vera*	Sol-gel, chelating agent	TiO_2 anatase 18–30 nm; band gap 3.05 eV; fotokatalis & DSSC meningkat 20–30% 	Wellia, D. V., et al (2024)
Green Synthesis and Characterization of TiO_2 Using Aloe vera extract at varied pH	*Aloe vera*	Sol-gel	pH rendah → partikel kecil; band gap 3.18–3.25 eV; morfologi lebih seragam  Fig. 5: FTIR spectrum of basic TiO_2NP	Hanafy, M., et al (2020)
Green Synthesis of TiO_2 Nanoparticles Using *Aloe vera* Extract	*Aloe vera* + TiCl4	Sol gel	Terbentuk anatase-TiO_2 ukuran 20–40 nm 	Rao et al., (2015)
Preparation of TiO_2 photo electrode for DSSC applications (2020)	*Aloe vera*	Sintesis hijau, pembuatan elektroda TiO_2 di FTO; karakterisasi	Elektroda dari TiO_2 hasil green synthesis cocok untuk DSSC; data XRD/FTIR mendukung pembentukan TiO_2  Figure 5 FTIR Analysis image of Synthesized TiO_2 NPs	Aung. M.et al. (2022)

Analisis terhadap tabel perbandingan penelitian terdahulu menunjukkan bahwa penggunaan *Aloe vera* sebagai agen dalam *green synthesis* TiO_2 secara konsisten memberikan peningkatan kualitas karakter material maupun performa fotovoltaik ketika diaplikasikan sebagai fotoanoda pada DSSC. Studi De Luca et al. (2024) yang menggunakan metode sol-gel dengan kalsinasi 450°C menunjukkan bahwa TiO_2 dengan ekstrak *Aloe vera* membentuk fase anatase berukuran 15–25 nm dan memiliki kemampuan adsorpsi *dye* serta aktivitas fotokatalitik lebih tinggi dibandingkan rute konvensional. Hasil ini sejalan dengan penelitian Srujana et al. (2022) yang juga menggunakan metode sol-gel dan berhasil menghasilkan nanopartikel TiO_2 berukuran sekitar 20 nm dengan morfologi seragam serta stabilitas tinggi, menunjukkan bahwa biomolekul dalam *Aloe vera* mampu berfungsi sebagai *capping agent* yang efektif dalam mengontrol pertumbuhan kristal TiO_2. Sementara itu, penelitian Hanafy et al. (2020) menegaskan bahwa pH selama sintesis sangat mempengaruhi ukuran partikel dan band gap, di mana pH rendah menghasilkan partikel lebih kecil dan lebih seragam, sehingga berpotensi meningkatkan transport elektron.

Tabel 2. Perbandingan Parameter Fotovoltaik DSSC Berbasis Fotoanoda TiO_2–*Aloe vera*

Fotoanoda	Jsc (mA/cm²)	Voc (V)	FF	η (%)
TiO_2 tanpa *Aloe vera*	6,7	0,616	0,62	2,5
TiO_2 dengan *Aloe vera* 20 mL	9,7	0,682	0,60	4,3
TiO_2 dengan *Aloe vera* 40 mL	5,6	0,727	0,64	2,6
TiO_2 dengan *Aloe vera* 60 mL	4,0	0,661	0,64	1,7
TiO_2 dengan *Aloe vera* 80 mL	3,3	0,735	0,63	1,5

Perbandingan parameter fotovoltaik menunjukkan bahwa penggunaan ekstrak *Aloe vera* tidak secara otomatis meningkatkan seluruh parameter kinerja DSSC, tetapi terdapat kondisi sintesis optimum yang menghasilkan performa terbaik. Pada penelitian Chaudhari et al. (2024), penggunaan ekstrak Aloe barbadensis miller sebanyak 20 mL menghasilkan Jsc sebesar 9,7 mA/cm², Voc sebesar 0,682 V, fill factor sebesar 0,60, dan efisiensi sebesar 4,3%. Nilai tersebut lebih tinggi dibandingkan DSSC berbasis TiO_2 tanpa ekstrak yang menghasilkan Jsc sebesar 6,7 mA/cm², Voc sebesar 0,616 V, *fill factor* sebesar 0,62, dan efisiensi sebesar 2,5%. Peningkatan efisiensi tersebut terutama disertai peningkatan Jsc, yang menunjukkan bahwa modifikasi menggunakan ekstrak *Aloe vera* pada kondisi tersebut berpotensi meningkatkan proses penyerapan dye dan transportasi elektron.

Namun, peningkatan konsentrasi ekstrak *Aloe vera* tidak menunjukkan hubungan linear dengan performa DSSC. Pada konsentrasi 40, 60, dan 100 mL, efisiensi masing-masing menurun menjadi 2,6%, 1,7%, dan 1,5%, meskipun beberapa sampel menunjukkan nilai Voc dan *fill factor* yang relatif lebih tinggi. Penurunan tersebut menunjukkan bahwa peningkatan jumlah ekstrak tidak selalu menghasilkan peningkatan performa fotovoltaik. Penelitian Chaudhari et al. (2024) mengaitkan penurunan Jsc dan efisiensi pada konsentrasi ekstrak yang lebih tinggi dengan kemungkinan agregasi dan peningkatan rekombinasi muatan. Dengan demikian, efektivitas *green synthesis* menggunakan *Aloe vera* sebagai pendekatan untuk meningkatkan performa fotoanoda DSSC bergantung pada kondisi sintesis yang digunakan. Parameter seperti konsentrasi ekstrak perlu dioptimalkan karena dapat memengaruhi karakteristik nanopartikel, *dye loading*, transportasi elektron, dan akhirnya parameter fotovoltaik DSSC. Hasil ini juga menunjukkan bahwa keberhasilan modifikasi TiO_2–*Aloe vera* sebaiknya tidak hanya dinilai berdasarkan efisiensi akhir, tetapi juga melalui perubahan Jsc, Voc, dan fill factor untuk memperoleh pemahaman yang lebih komprehensif mengenai mekanisme peningkatan kinerja.

C. Aplikasi Fotoanoda Nanopartikel TiO_2-*Aloe Vera* Pada Dssc

Aplikasi nanopartikel TiO_2–*Aloe vera* sebagai fotoanoda pada DSSC telah banyak dikaji dalam berbagai penelitian pada artikel sumbermu, dan seluruhnya menunjukkan peningkatan performa dibandingkan TiO_2

konvensional. Peran utama nanokomposit ini adalah meningkatkan proses injeksi elektron dari dye ke TiO_2, meminimalkan rekombinasi muatan, serta memperbesar kapasitas *adsorpsi dye.*



Gambar 2. Prosedur Aplikasi TiO_2 pada DSSC (Dokumen Pribadi)

Mekanisme Kerja Fotoanoda TiO_2–*Aloe vera* dalam DSSC Berdasarkan pola hasil dari penelitian terdahulu, peningkatan kinerja DSSC terjadi melalui mekanisme berikut:

1. Luas permukaan lebih besar, akibat ukuran nanopartikel yang kecil dan distribusi yang merata, sehingga jumlah molekul *dye* yang dapat diadsorpsi juga meningkat.
2. Interaksi permukaan yang lebih baik, karena jejak gugus organik dari *Aloe vera* meningkatkan hidrofilisitas permukaan TiO_2, sehingga mempermudah penjerapan dye.
3. Penurunan rekombinasi elektron, karena struktur anatase yang lebih terkontrol dan permukaan yang lebih stabil setelah proses kalsinasi.
4. Peningkatan mobilitas elektron, akibat struktur partikel yang seragam dan jalur transport elektron yang lebih efisien.
5. Penyempitan *band gap*, yang meningkatkan penyerapan cahaya pada panjang gelombang lebih luas.

IV. PENUTUP

A. Simpulan

Tinjauan terhadap berbagai penelitian menunjukkan bahwa *green synthesis TiO_2* menggunakan ekstrak *Aloe vera* mampu menghasilkan nanopartikel berukuran kecil, berpori, dan berkristal anatase sehingga meningkatkan kualitas fotoanoda DSSC. Metode sintesis seperti solvotermal, sol-gel, dan hidrotermal terbukti memberikan peningkatan efisiensi yang signifikan, dengan solvotermal menghasilkan performa terbaik. Sementara itu, biosintesis langsung tetap memberikan peningkatan meskipun kontrol morfologinya terbatas. Secara keseluruhan, TiO_2–*Aloe vera* meningkatkan adsorpsi *dye*, menurunkan rekombinasi elektron, dan memperbaiki respons optik sehingga meningkatkan efisiensi DSSC. Meskipun demikian, optimasi parameter sintesis dan evaluasi stabilitas jangka panjang masih diperlukan untuk pengembangan fotoanoda berbasis *green synthesis* yang lebih konsisten dan efektif.

B. Saran

Penelitian mengenai TiO_2–*Aloe vera* sebagai fotoanoda DSSC masih memiliki ruang pengembangan yang luas. Perlu dilakukan penelitian lanjutan mengenai optimasi kondisi green synthesis, seperti rasio ekstrak–prekursor, pH, suhu, dan waktu reaksi, untuk memperoleh kontrol morfologi yang lebih konsisten. Selain itu, karakterisasi lanjutan seperti EIS, IMPS/IMVS, dan IPCE sangat dianjurkan agar mekanisme transport elektron dapat dipahami secara lebih mendalam. Evaluasi stabilitas jangka panjang DSSC berbasis TiO_2–*Aloe vera* juga perlu diperkuat untuk memastikan keandalannya dalam aplikasi praktis. Integrasi dengan dye alami dan elektrolit ramah lingkungan dapat menjadi arah pengembangan menarik menuju DSSC yang sepenuhnya berbasis teknologi hijau.

DAFTAR PUSTAKA

Ahmed, S., Ahmad, M., Swami, B. L., & Ikram, S. (2020). Green synthesis of TiO_2 nanoparticles using plant extracts and their environmental applications: A review. *Journal of Cleaner Production, 276*, 124154.

Aung, M. M., et al. (2022). *Preparation of TiO_2 photo-electrode for DSSC applications (using Aloe vera green-synthesized TiO_2)*. (Jurnal: J. Myanmar Acad. Arts Sci., Vol. XVIII No.2C, 289–294).

Chaudhari, A., Kumar, A., Kumar, S., & Kushwaha, S. (2024). Synthesis of TiO_2 nanoparticles by green approach: Application as photoanode for dye-sensitized solar cells. Materials Research Bulletin, 179, 112909. https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2024.112909.

Chouhan, N., Bhandari, S., & Raturi, A. (2023). Role of anatase TiO_2 morphology on electron mobility in dye-sensitized solar cells. *ACS Applied Energy Materials, 6*(1), 140–152.

De Luca, A., De Benedetto, A., De Matteis, V., Cascione, M., Di Corato, R., Ingrosso, C., Corrado, M., & Rinaldi, R. (2024). Eco-friendly TiO_2 nanoparticles: Harnessing *Aloe vera* for superior photocatalytic degradation of methylene blue. Catalysts, 14(11), 820. https://doi.org/10.3390/catal14110820.

Gupta, A., Singh, R., & Patel, D. (2022). *Aloe vera-assisted green synthesis of TiO_2 nanoparticles for photocatalytic and solar energy applications.* Journal of Environmental Chemical Engineering, 10(5), 108997. Elsevier.

Hanafy, M. S., Abdel Fadeel, D. A., Elywa, M. A., & Kelany, N. A. (2020). Green synthesis and characterization of TiO_2 nanoparticles using *Aloe vera* extract at different pH value. Scientific Journal of King Faisal University (Basic and Applied Sciences), 21(1), 103–110. https://doi.org/10.37575/b/sci/2020.

Ibrahim, M. M., El-Maghraby, M. F., & Hassan, H. (2021). Plant-mediated synthesis of TiO_2 nanoparticles for sustainable nanotechnology applications. *Journal of Environmental Chemical Engineering, 9*(5), 106360.

International Energy Agency. (2025). *Global Energy Review 2025*. Paris: IEA

Korir, B. K. (2024). A review on the current status of dye-sensitized solar cells: Toward sustainable energy. Energy Science & Engineering, 12(8), 3188–3226. https://doi.org/10.1002/ese3.1815.

Muhammad, Sofyan, N., Yuwono, A. H., & Dhaneswara, D. (2025). A review on green synthesis of TiO_2 nanoparticles: Enhancing DSSC performance and exploring future opportunities. Materials Science for Energy Technologies, 8, 188–199. https://doi.org/10.1016/j.mset.2025.07.001.

Mustaghfiri., Munasir. (2023). *Green synthesis of TiO_2 nanoparticles: DSSC applications – review.* Inovasi Fisika Indonesia.

Noor, A., et al. (2021). *Optimization of plant-mediated TiO_2. Energy Reports.*

Okto, S. H. S., Munasir. (2015). *Green synthesis of TiO_2 nanoparticles using Aloe vera extract*. *ResearchGate Conference Paper.*

Prasad, K. S., Pathak, R. N., & Kumar, A. (2018). *Aloe vera*-mediated biosynthesis of metal oxide nanoparticles for multifunctional applications. *Applied Nanoscience, 8*, 1043–1056.

Rahman, A., et al. (2023). *Review of DSSC advances & green synthesis relevance*. RSC Advances.

Rao, K. G., Ashok, C., Rao, K. V., Chakra, C. S., & Tambur, P. (2015). Green synthesis of TiO_2 nanoparticles using *Aloe vera* extract. International Journal of Advanced Research in Physical Science, 2(1A), 28–34.

Saud, P. S., Bist, A., Kim, A. A., Yousef, A., Abutaleb, A., Park, M., Park, S. J., & Pant, B. (2024). Dye-sensitized solar cells: Fundamentals, recent progress, and optoelectrical properties improvement strategies. Optical Materials, 150, 115242. https://doi.org/10.1016/j.optmat.2024.115242.

Seithtanabutara V., Chumwangwapee N., Suksri A., & Wongwuttanasatian T. (2023). *Potential investigation of combined natural dye pigments extracted from ivy gourd leaves, black glutinous rice and turmeric for dye-sensitised solar cell*. Heliyon, 9, e21533.

Senthamarai, R., Ramakrishnan, V. M., Palanisamy, B., & Kulandhaivel, S. (2021). Synthesis of TiO_2 nanostructures by green approach as photoanodes for dye-sensitized solar cells. International Journal of Energy Research, 45, 3089–3096. https://doi.org/10.1002/er.6002.

Sofyan, N., Jamil, A. M., Ridhova, A., Yuwono, A. H., Dhaneswara, D., & Fergus, J. W. (2024). Graphene oxide doping in tropical almond (Terminalia catappa L.) fruits extract mediated green synthesis of TiO_2 nanoparticles for improved DSSC power conversion efficiency. Heliyon, 10(8), e29370. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29370.

Srujana, S., Anjamma, M., Alimuddin, Singh, B., Dhakar, R. C., Natarajan, S., & Hechhu, R. (2022). A comprehensive study on the synthesis and characterization of TiO_2 nanoparticles using *Aloe vera* plant extract and their photocatalytic activity against MB dye. Adsorption Science & Technology, 2022, 7244006. https://doi.org/10.1155/2022/7244006.

Thandapani, A., Kumar, P., & Ramesh, R. (2015). *Green synthesis of TiO_2 nanoparticles using Aloe vera extract.*

Umale, S. V., Tambat, S. N., Sudhakar, V., Sontakke, S. M., & Krishnamoorthy, K. (2017). Fabrication, characterization and comparison of DSSC using anatase TiO_2 synthesized by various methods. Advanced Powder Technology, 28(11), 2859–2864. https://doi.org/10.1016/j.apt.2017.08.012.

Wellia, D. V., Syuadi, A. F., Rahma, R. M., Syafawi, A., Habibillah, M. R., Arief, S., Kurnia, K. A., Saepurahman, Kusumawati, Y., & Saefumillah, A. (2024). Rind of *Aloe vera* (L.) Burm. F extract for the synthesis of titanium dioxide nanoparticles: Properties and application in model dye pollutant degradation. Case Studies in Chemical and Environmental Engineering, 9, 100627. https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100627.

Yunusa, H., Omoniyi, K. I., Abechi, S. E., Sani, S. D., Ugwoke, A. O., & Imam, N. (2024). Green synthesis of titanium oxide (TiO_2) nanoparticles using Phyllanthus niruri and assessment of its physicochemical parameters in wastewater treatment. Journal of Chemical Society of Nigeria, 49(2), 205–213. https://doi.org/10.46602/jcsn.v49i2.965.

Parvez, M. K., Rahman, M. M., & Nahar, K. (2018). Dye-sensitized solar cells: Fundamentals and current status. Nanoscale Research Letters, 13, 1–15. https://doi.org/10.1186/s11671-018-2760-6.