MASALIQ
Jurnal Pendidikan dan Sains

e-ISSN: 2808-8115
p-ISSN: 2809-1051

Terindeks: Sinta 5, Copernicus, Dimensions, Scilit, Lens, Crossref, Garuda, Google Scholar, Base, etc

https://doi.org/10.58578/masaliq.v6i4.10523

PENGARUH PARAMETER GREEN SINTESIS TiO_2 BERBASIS METODE SOLVOTERMAL TERHADAP UKURAN PARTIKEL DAN UKURAN KRISTAL: *A SYSTEMATIC REVIEW*

Effect of Green Synthesis Parameters of TiO_2Based on the Solvothermal Method on Particle Size and Crystal Size: A Systematic Review

Dian Wijaya Kurniawidi, Kormil Saputra, Nur Azzahra Al Radhiyah, Indrawan Eka Badri, Ika Umratul Asni Aminy
Universitas Mataram
ikaumratulasni@staff.unram.ac.id; diankurnia@unram.ac.id

Article Info:

Submitted:	Revised:	Accepted:	Published:
Apr 25, 2026	May 23, 2026	Jun 4, 2026	Jun 9, 2026

Abstract

Titanium dioxide (TiO_2) is a semiconductor material widely used in photocatalysis, sensor, energy conversion, and environmental remediation applications because its performance is strongly influenced by structural characteristics, particularly particle size, crystal size, morphology, and crystal phase. This systematic review aims to analyze the influence of green synthesis parameters based on the solvothermal method on the particle size and crystal size of TiO_2. Articles were collected from the Scopus, ScienceDirect, and Google Scholar databases within the 2021–2025 publication range using combinations of Boolean keywords related to solvothermal synthesis, TiO_2, and green synthesis. Article selection was conducted based on inclusion and exclusion criteria emphasizing original research articles, the use of the solvothermal method, a green synthesis approach, and the availability of material characterization data. The review results showed that four articles met the inclusion

Masaliq Journal is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License

criteria, with variations in TiO_2 particle size ranging from 25.41 to 100 nm and crystal size ranging from 0.96 to 31.9 nm. Parameters such as precursor type, solvent, green extract, solvothermal temperature, and processing time played important roles in regulating nucleation, crystal growth, surface stabilization, and particle agglomeration. The smallest particle size was obtained in the titanium isopropoxide–deionized water–banana peel system at 100 °C, whereas modified systems such as Ag-doped TiO_2 and TiO_2@g-C_3N_4 showed that application performance is determined not only by particle size but also by electronic engineering and interface structure. The conclusion of this review affirms that the optimization of green solvothermal synthesis of TiO_2 needs to be directed toward integrated control of particle size, crystal size, crystal phase, morphology, and application performance. The implications of this review contribute to the development of more targeted, efficient, and relevant green TiO_2 synthesis for sustainable functional material applications.

Keywords: TiO_2; Green Synthesis; Solvothermal Method; Particle Size; Crystal Size

Abstrak: *Titanium dioxide* (TiO_2) merupakan material semikonduktor yang banyak digunakan dalam aplikasi fotokatalisis, sensor, konversi energi, dan remediasi lingkungan karena performanya sangat dipengaruhi oleh karakteristik struktural, terutama ukuran partikel, ukuran kristal, morfologi, dan fase kristal. Kajian sistematis ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh parameter *green synthesis* berbasis metode solvotermal terhadap ukuran partikel dan ukuran kristal TiO_2. Artikel dikumpulkan dari basis data Scopus, ScienceDirect, dan Google Scholar pada rentang publikasi 2021–2025 menggunakan kombinasi kata kunci Boolean yang berkaitan dengan *solvothermal synthesis*, TiO_2, dan *green synthesis*. Seleksi artikel dilakukan berdasarkan kriteria inklusi dan eksklusi yang menekankan pada artikel penelitian asli, penggunaan metode solvotermal, pendekatan sintesis hijau, serta ketersediaan data karakterisasi material. Hasil kajian menunjukkan bahwa empat artikel memenuhi kriteria inklusi, dengan variasi ukuran partikel TiO_2 pada rentang 25,41–100 nm dan ukuran kristal pada kisaran 0,96–31,9 nm. Parameter seperti jenis prekursor, pelarut, ekstrak hijau, suhu solvotermal, dan waktu proses berperan penting dalam mengatur nukleasi, pertumbuhan kristal, stabilisasi permukaan, dan aglomerasi partikel. Ukuran partikel terkecil diperoleh pada sistem *titanium isopropoxide*–air deionisasi–kulit pisang pada suhu 100 °C, sedangkan sistem modifikasi seperti *Ag-doped* TiO_2 dan TiO_2@g-C_3N_4 menunjukkan bahwa performa aplikatif tidak hanya ditentukan oleh ukuran partikel, tetapi juga oleh rekayasa elektronik dan struktur antarmuka. Simpulan kajian ini menegaskan bahwa optimasi *green solvothermal synthesis* TiO_2 perlu diarahkan pada pengendalian terpadu terhadap ukuran partikel, ukuran kristal, fase kristal, morfologi, dan performa aplikasi. Implikasi kajian ini memberikan kontribusi bagi pengembangan sintesis hijau TiO_2 yang lebih terarah, efisien, dan relevan untuk aplikasi material fungsional berkelanjutan.

Kata Kunci: TiO_2; Sintesis Hijau; Metode Solvotermal; Ukuran Partikel; Ukuran Kristal

PENDAHULUAN

Titanium dioxide (TiO_2) merupakan semikonduktor oksida logam yang banyak dikembangkan karena memiliki stabilitas kimia tinggi, biaya produksi relatif rendah, sifat optik yang khas, serta kompatibilitas yang luas terhadap berbagai metode sintesis dan

modifikasi material (Nematov dkk., 2024a). Material ini telah digunakan secara luas dalam fotokatalisis, pemurnian air dan udara, permukaan *self-cleaning*, antibakteri, sensor, konversi energi, serta sistem fotoelektrokimia karena kemampuannya menghasilkan spesies reaktif di bawah iradiasi cahaya dan mempertahankan stabilitas struktur selama proses reaksi (Siti Aida Ibrahim & Sreekantan, 2010). Dalam aplikasi berbasis permukaan, performa TiO_2 sangat dipengaruhi oleh karakteristik struktural dan morfologinya, terutama fase kristal, ukuran kristal, ukuran partikel, luas permukaan, serta tingkat aglomerasi partikel (Nematov, 2024; Syngelakis dkk., 2023). Secara kristalografi, TiO_2 umumnya ditemukan dalam tiga polimorf utama, yaitu anatase, rutile, dan brookite; anatase dan rutile merupakan dua fase yang paling banyak dikaji karena keduanya memiliki struktur elektronik dan aktivitas fotokatalitik yang berbeda, sedangkan kombinasi anatase–rutile dapat memengaruhi pemisahan muatan dan efisiensi fotokatalitik material (Nematov, 2024; Nematov dkk., 2024b).

Pengembangan TiO_2 berukuran nano menjadi penting karena penurunan ukuran partikel dan ukuran kristal dapat meningkatkan luas permukaan aktif, memperpendek jalur difusi pembawa muatan, serta memperbesar jumlah situs reaksi pada permukaan material (Zulfiqar dkk., 2025). Namun, pembentukan TiO_2 berskala nano tidak hanya ditentukan oleh metode sintesis, tetapi juga oleh kondisi reaksi yang mengontrol proses hidrolisis, kondensasi, nukleasi, pertumbuhan kristal, transformasi fase, dan aglomerasi partikel (Zhang dkk., 2025; Zulfiqar dkk., 2025). Jenis prekursor titanium, pelarut, konsentrasi prekursor, suhu, waktu reaksi, pH, serta keberadaan aditif atau agen penstabil dapat mengubah ukuran kristal, distribusi partikel, morfologi, dan fase TiO_2 yang terbentuk (Mamazieva dkk., 2025; Zhang dkk., 2025). Oleh karena itu, pengendalian parameter sintesis menjadi bagian penting dalam desain TiO_2, terutama ketika material tersebut ditujukan untuk aplikasi fotokatalitik, energi, atau remediasi lingkungan yang sangat bergantung pada sifat permukaan dan karakter elektronik material (Stride & Tuong, 2010).

Dalam beberapa tahun terakhir, pendekatan *green synthesis* semakin banyak digunakan untuk mengembangkan TiO_2 berukuran nano melalui proses yang lebih sederhana, lebih ekonomis, dan lebih sejalan dengan prinsip keberlanjutan (Lestari & Masriah, 2025). Pendekatan ini umumnya memanfaatkan ekstrak tanaman, biomassa, mikroorganisme, atau limbah organik sebagai komponen pendukung dalam proses sintesis, baik sebagai agen penstabil, pengarah pertumbuhan, maupun pengendali aglomerasi nanopartikel (Eddy dkk., 2024; Lestari & Masriah, 2025). Senyawa bioaktif dalam ekstrak tanaman, seperti polifenol, flavonoid, asam organik, saponin, dan gugus hidroksil, dapat berinteraksi dengan prekursor

titanium dan permukaan partikel yang sedang tumbuh, sehingga memengaruhi proses pembentukan inti, pertumbuhan kristal, stabilitas koloid, serta karakteristik akhir TiO_2 (Eddy dkk., 2024; Selvi dkk., 2022). Studi terbaru juga menunjukkan bahwa TiO_2 hasil sintesis berbasis ekstrak tanaman dapat memiliki aktivitas fotokatalitik, antibakteri, dan fungsionalitas permukaan yang kompetitif dibandingkan material yang disintesis melalui rute konvensional tertentu (Lestari & Masriah, 2025).

Di antara berbagai metode sintesis, metode solvotermal memiliki keunggulan karena mampu mengatur pembentukan kristal dan morfologi material melalui kontrol terhadap suhu, tekanan, waktu reaksi, jenis pelarut, dan konsentrasi prekursor (Karpovich dkk., 2013). Pada sistem TiO_2, metode ini memungkinkan pembentukan material dengan fase, ukuran kristal, dan morfologi yang dapat diarahkan melalui pengaturan lingkungan reaksi, termasuk polaritas pelarut, reaktivitas prekursor, dan kondisi termal selama proses sintesis (Karpovich dkk., 2013; Roca & Leite, 2013). Ketika dikombinasikan dengan pendekatan *green synthesis*, metode solvotermal berpotensi menghasilkan TiO_2 dengan ukuran partikel dan ukuran kristal yang lebih terkontrol sekaligus mengurangi ketergantungan pada agen kimia tertentu. Akan tetapi, studi-studi yang telah dilaporkan menunjukkan variasi parameter yang sangat luas, misalnya penggunaan titanium isopropoxide atau titanium butoxide sebagai prekursor, air deionisasi atau etanol sebagai pelarut, serta kulit pisang, daun ara, dan daun *Ziziphus jujube* sebagai sumber ekstrak hijau. Variasi tersebut menghasilkan perbedaan ukuran partikel, ukuran kristal, morfologi, fase kristal, serta performa aplikatif TiO_2 (Bian dkk., 2016).

Keragaman temuan tersebut menunjukkan bahwa keberhasilan sintesis TiO_2 melalui pendekatan *green solvothermal synthesis* tidak dapat dinilai hanya dari terbentuknya material TiO_2, tetapi perlu ditinjau dari bagaimana parameter proses mengarahkan struktur nano yang terbentuk (Karpovich dkk., 2013). Sebagian besar penelitian yang tersedia masih disajikan sebagai laporan eksperimen individual yang menekankan keberhasilan sintesis, karakterisasi, dan aplikasi tertentu, sedangkan hubungan antara parameter sintesis, ukuran partikel, dan ukuran kristal belum dipetakan secara sistematis. Kondisi ini menyulitkan penentuan parameter mana yang cenderung menghasilkan ukuran partikel lebih kecil, ukuran kristal lebih terkontrol, morfologi lebih seragam, atau fase kristal yang lebih sesuai untuk aplikasi tertentu (Karpovich dkk., 2013; Stride & Tuong, 2010). Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengkaji secara sistematis pengaruh parameter *green synthesis* berbasis metode solvotermal terhadap ukuran partikel dan ukuran kristal TiO_2, dengan menelaah peran jenis

prekursor, konsentrasi prekursor, pelarut, sumber ekstrak hijau, konsentrasi ekstrak, suhu solvotermal, dan waktu proses terhadap karakteristik struktural TiO_2 yang dihasilkan.

METODE

1. Desain Penelitian dan Strategi Pencarian

Kajian sistematis ini diarahkan untuk menjawab pertanyaan utama tentang parameter green synthesis berbasis metode solvotermal memengaruhi ukuran partikel dan ukuran kristal TiO_2. Parameter yang dikaji meliputi jenis prekursor, konsentrasi prekursor, pelarut, sumber ekstrak hijau, konsentrasi ekstrak, suhu solvotermal, serta waktu pengadukan atau waktu reaksi. Fokus utama review ini adalah mengidentifikasi hubungan antara variasi parameter sintesis dan karakteristik TiO_2, khususnya ukuran partikel, ukuran kristal, morfologi, serta fase kristal. Penelitian ini menggunakan desain systematic literature review dengan pendekatan sintesis naratif. Pendekatan ini digunakan karena artikel yang dianalisis memiliki variasi pada jenis bahan hijau, prekursor, pelarut, kondisi solvotermal, serta metode karakterisasi. Proses seleksi artikel disusun dengan mengacu pada alur PRISMA yang meliputi tahapan identifikasi, penyaringan, kelayakan, dan inklusi akhir. Pencarian literatur dilakukan melalui basis data Scopus, ScienceDirect, dan Google Scholar pada rentang publikasi 2021–2025. Kata kunci disusun menggunakan teknik Boolean search dengan mengombinasikan istilah yang berkaitan dengan metode sintesis, material utama, dan pendekatan sintesis hijau, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Strategi Boolean search yang digunakan dalam pencarian literatur

No.	Boolean search
1	"solvothermal" AND "TiO_2" AND "green synthesis"
2	"solvothermal synthesis" AND "titanium dioxide" AND "green synthesis"
3	("solvothermal" OR "solvothermal synthesis") AND ("TiO_2" OR "titanium dioxide") AND ("green synthesis" OR "plant extract" OR "eco-friendly synthesis")
4	("TiO_2 nanoparticles" OR "titanium dioxide nanoparticles") AND ("green synthesis" OR "eco-friendly synthesis") AND ("solvothermal")

2. Kriteria Inklusi dan Eksklusi

Artikel diinklusi apabila memenuhi kriteria berikut: membahas TiO_2 atau material berbasis TiO_2, menggunakan metode solvotermal, menerapkan pendekatan *green synthesis*, memuat parameter sintesis yang relevan, menyajikan data karakterisasi seperti XRD, SEM/TEM, UV–Vis, FTIR, atau EDS, serta melaporkan ukuran partikel, ukuran kristal, morfologi, atau fase kristal. Artikel juga harus berupa *original research article*, dipublikasikan

pada 2021–2025, dan tersedia dalam bentuk teks lengkap. Artikel dikeluarkan apabila berupa review, book chapter, editorial, atau dokumen tanpa data eksperimen; tidak membahas TiO_2; tidak menggunakan metode solvotermal; tidak menerapkan pendekatan *green synthesis*; tidak menyajikan data karakterisasi yang relevan; atau tidak dapat diakses secara penuh.

3. Seleksi Artikel dan Ekstraksi Data

Seleksi artikel dilakukan secara bertahap. Pada tahap identifikasi, seluruh artikel yang diperoleh dari Scopus, ScienceDirect, dan Google Scholar dikumpulkan berdasarkan kata kunci yang telah ditentukan. Selanjutnya, artikel duplikat, review, buku, dan dokumen yang tidak relevan dieliminasi. Pada tahap penyaringan, judul dan abstrak diperiksa untuk menilai kesesuaian dengan fokus kajian. Artikel yang lolos tahap ini kemudian dibaca secara penuh untuk memastikan kesesuaian metode sintesis, kelengkapan parameter proses, dan ketersediaan data ukuran partikel atau ukuran kristal. Data yang diekstraksi meliputi identitas artikel, negara, jurnal, tujuan penelitian, jenis material, prekursor, pelarut, ekstrak hijau, suhu solvotermal, waktu pengadukan atau reaksi, morfologi, ukuran partikel, ukuran kristal, fase kristal, serta performa aplikatif. Seluruh data disusun dalam tabel komparatif untuk memudahkan analisis antarstudi.

4. Analisis dan Sintesis Data

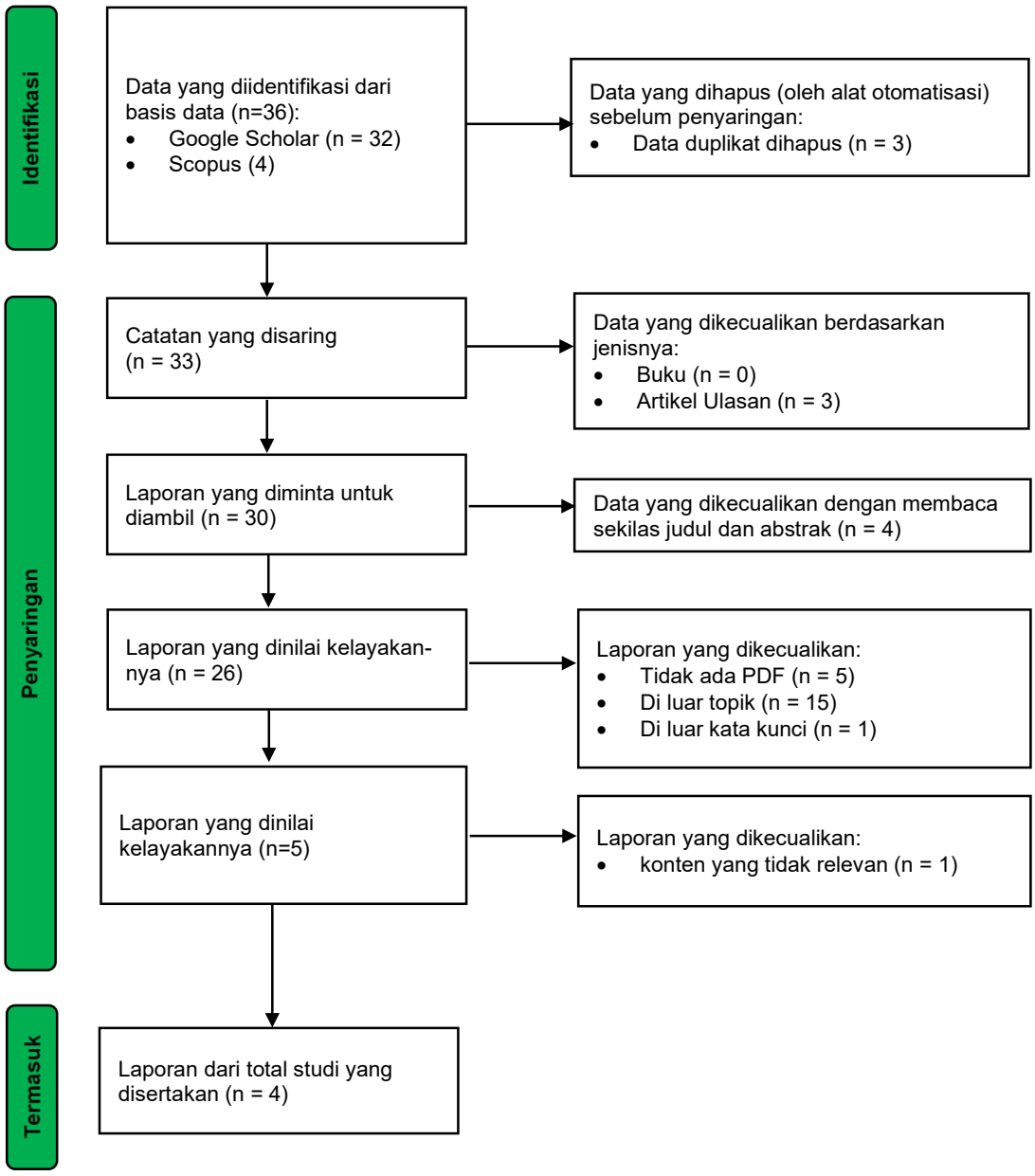
Data dianalisis secara deskriptif-komparatif melalui sintesis naratif. Analisis difokuskan pada hubungan antara parameter *green solvothermal synthesis* dan karakteristik TiO_2, terutama ukuran partikel dan ukuran kristal. Ukuran partikel dan ukuran kristal diperlakukan sebagai dua parameter berbeda karena ukuran partikel umumnya diperoleh dari SEM atau TEM, sedangkan ukuran kristal biasanya dihitung dari data XRD menggunakan persamaan Scherrer. Sintesis dilakukan dengan menelaah pola pengaruh prekursor, pelarut, ekstrak hijau, suhu, dan waktu proses terhadap pembentukan morfologi, ukuran partikel, ukuran kristal, serta fase TiO_2 yang dihasilkan.

HASIL

1. *Characteristics of Included Studies*

Proses seleksi literatur dalam kajian ini dilakukan secara sistematis dengan mengacu pada alur PRISMA, mulai dari tahap identifikasi artikel pada basis data ilmiah, penyaringan berdasarkan jenis dokumen dan relevansi topik, penilaian kelayakan melalui pembacaan teks

penuh, hingga penetapan artikel akhir yang digunakan dalam analisis, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram alur seleksi artikel menggunakan pendekatan PRISMA dalam systematic review green synthesis TiO2 berbasis metode solvotermal

Gambar 1 menunjukkan alur seleksi artikel dalam systematic review ini berdasarkan pendekatan PRISMA. Pada tahap identification, pencarian literatur dilakukan melalui tiga basis data, yaitu Scopus, ScienceDirect, dan Google Scholar. Dari proses pencarian awal diperoleh 38 artikel, terdiri atas 20 artikel dari Scopus, 13 artikel dari ScienceDirect, dan 5 artikel dari Google Scholar. Selanjutnya, pada tahap screening, artikel review, book chapter,

dan dokumen yang tidak sesuai dieliminasi sebanyak 12 artikel, sehingga tersisa 26 artikel untuk disaring berdasarkan judul dan abstrak.

Tabel 1. Karakteristik bibliografis, tujuan, dan temuan utama studi green synthesis TiO_2 berbasis metode solvotermal

(Penulis, Tahun)	Negara	Nama Jurnal	Publisher	Tujuan	Kata Kunci	Hasil	Sit.
(Zaidan dkk., 2022)	Iraq	Iraqi journal of applied physics	Iraqi Society for Alternative And Renewable Energy Sources and Techniques	Mensintesis nanopowder TiO_2 berfase campuran anatase–rutile melalui metode solvotermal dengan memanfaatkan kulit pisang dan titanium isopropoxide sebagai prekursor, serta mengevaluasi karakteristik struktural dan spektroskopinya.	Titanium Dioxide; Nanoparticles; Solvothermal Method; Green synthesis	Green synthesis berbasis kulit pisang berhasil digunakan dalam sintesis nanopowder TiO_2 berfase campuran anatase–rutile melalui metode solvotermal, menghasilkan material polikristalin berukuran minimum 25,41 nm, murni secara unsur, dan berpotensi untuk aplikasi fotokatalitik.	23
(Challoob dkk., 2024)	Iraq	Iraqi Journal of Applied Physics	American Quality For Scientific Publishing, INC. (Middle East Branch)	Mensintesis nanopowder TiO_2 fase campuran anatase–rutile melalui metode solvotermal ramah lingkungan serta mengevaluasi karakteristik struktur, morfologi, dan sifat optiknya.	Titanium Dioxide; Nanoparticles; Solvothermal Method; Green Synthesis	*Nanopowder* TiO_2 tetragonal fase campuran anatase–rutile berhasil disintesis dengan ukuran partikel minimum 53,48 nm, memiliki kemurnian tinggi, menyerap kuat pada wilayah UV, serta menunjukkan band gap 3,14 eV yang sesuai dengan karakteristik TiO_2 fase campuran.	26
(Sharif dkk., 2023)	Saudi Arabia dan India	Materials	MDPI	Mensintesis TiO_2 dan Ag- TiO_2 serta meningkatkan kinerja DSSC melalui doping Ag	Green Modified Solvothermal Synthesis; TiO_2 ; Ag- TiO_2 ; Photovoltaic Performance	Ag-doped TiO_2 berhasil disintesis dengan ukuran kristalit rata-rata 13 nm dan mampu meningkatkan kinerja DSSC secara signifikan, dengan efisiensi tertinggi 2,45% pada doping Ag 4%, lebih tinggi dibandingkan	28

						TiO_2 murni sebesar 0,62%.	
(Abdallah dkk., 2025)	Oman	Journal of photochemistry and photobiology A: Chemistry	Elsevier	Mensintesis nanokomposit TiO_2@g-C_3N_4 secara green synthesis dan mengevaluasi kemampuannya dalam mendegradasi polutan (Bisphenol A dan Malathion) melalui proses fotokatalisis	Green synthesis, TiO_2@g-C_3N_4 Nanocomposites, Toxic Organics, Photocatalytic Degradation, UV Light	*Green* TiO_2, g-C_3N_4, dan nanokomposit TiO_2@g-C_3N_4 berhasil disintesis melalui metode solvotermal berbasis ekstrak daun Ziziphus jujube, dengan performa fotokatalitik terbaik ditunjukkan oleh 50% TiO_2@g-C_3N_4 untuk degradasi Bisphenol A sebesar 71% dan 20% TiO_2@g-C_3N_4 untuk degradasi Malathion sebesar 74% di bawah iradiasi UV-B.	57

Dari tahap ini, sebanyak 21 artikel dikeluarkan karena tidak sesuai dengan fokus kajian, tidak membahas TiO_2, tidak menggunakan metode solvotermal, atau tidak memuat pendekatan *green synthesis*. Sebanyak 5 artikel kemudian dinilai melalui pembacaan teks penuh pada tahap eligibility. Setelah penilaian lebih lanjut, 1 artikel dieliminasi karena tidak menyediakan data utama yang diperlukan, khususnya parameter sintesis, ukuran partikel, atau ukuran kristal secara memadai. Dengan demikian, sebanyak 4 artikel memenuhi seluruh kriteria inklusi dan digunakan sebagai dasar analisis dalam systematic review ini. Artikel yang memenuhi kriteria inklusi kemudian dipetakan berdasarkan karakteristik bibliografis, tujuan penelitian, kata kunci, dan temuan utama yang disajikan pada **Tabel 1**.

Tabel 1 menyajikan karakteristik bibliografis dan temuan utama dari empat studi yang membahas sintesis TiO_2 dan material berbasis TiO_2 melalui pendekatan *green synthesis* dengan metode solvotermal. Artikel yang dianalisis berasal dari beberapa negara, yaitu Iraq, Saudi Arabia, India, dan Oman, serta dipublikasikan pada periode 2022–2025. Sebagian besar studi berfokus pada pengembangan nanopowder TiO_2 berfase campuran anatase–rutile, baik dalam bentuk TiO_2 murni, TiO_2 terdoping Ag, maupun nanokomposit TiO_2@g-C_3N_4. Secara umum, tujuan utama dari studi-studi tersebut adalah menghasilkan material TiO_2 berukuran nano melalui rute sintesis yang lebih ramah lingkungan, sederhana, dan berbiaya

rendah, sekaligus mengevaluasi hubungan antara karakteristik struktural, morfologi, optik, dan performa aplikatif material yang dihasilkan.

Dari aspek bahan hijau yang digunakan, studi Zaidan dkk., (2022) memanfaatkan kulit pisang sebagai komponen pendukung dalam sintesis nanopowder TiO_2, sedangkan Abdallah dkk., (2025) menggunakan ekstrak daun *Ziziphus jujube* sebagai *green template* dalam pembentukan TiO_2, g-C_3N_4, dan nanokomposit TiO_2@g-C_3N_4. Penggunaan sumber hayati tersebut menunjukkan bahwa limbah biomassa dan ekstrak tanaman dapat berperan dalam mendukung proses pembentukan nanomaterial TiO_2 secara lebih ramah lingkungan. Pada studi Zaidan dkk., (2022), pendekatan solvotermal berbasis kulit pisang menghasilkan TiO_2 polikristalin berfase campuran anatase–rutile dengan ukuran partikel minimum 25,41 nm dan kemurnian unsur yang baik, karena hanya unsur Ti dan O yang terdeteksi pada sampel akhir. Sementara itu, Challoob dkk., (2024) melaporkan bahwa metode solvotermal ramah lingkungan mampu menghasilkan nanopowder TiO_2 tetragonal berfase anatase–rutile dengan ukuran partikel minimum 53,48 nm, serapan kuat pada wilayah UV, dan nilai *band gap* 3,14 eV yang berada dalam rentang karakteristik TiO_2 fase campuran. Variasi modifikasi material juga menjadi aspek penting yang terlihat dalam tabel. Sharif dkk., (2023) tidak hanya mensintesis TiO_2 murni, tetapi juga mengembangkan Ag-doped TiO_2 dengan konsentrasi doping 1–4% untuk aplikasi *dye-sensitized solar cells* atau DSSCs. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa doping Ag berkontribusi terhadap peningkatan transport muatan dan penurunan rekombinasi elektron, sehingga performa fotovoltaik DSSC meningkat secara signifikan. Efisiensi tertinggi diperoleh pada Ag-doped TiO_2 4% dengan nilai *power conversion efficiency* sebesar 2,45%, lebih tinggi dibandingkan TiO_2 murni yang hanya mencapai 0,62%. Temuan ini menunjukkan bahwa parameter sintesis tidak hanya berpengaruh terhadap ukuran kristalit, yang dilaporkan sekitar 13 nm, tetapi juga terhadap kinerja elektronik dan aplikatif material.

Pada studi Abdallah dkk., (2025), pembentukan nanokomposit TiO_2@g-C_3N_4 memperlihatkan bahwa kombinasi TiO_2 dengan semikonduktor lain dapat meningkatkan aktivitas fotokatalitik melalui pembentukan heterostruktur. Nanokomposit 50% TiO_2@g-C_3N_4 menunjukkan degradasi Bisphenol A sebesar 71% dengan laju reaksi $1{,}422 \times 10^{-2}$ menit^{-1}, sedangkan nanokomposit 20% TiO_2@g-C_3N_4 memberikan degradasi Malathion tertinggi sebesar 74% dengan laju reaksi $1{,}022 \times 10^{-2}$ menit^{-1} di bawah iradiasi UV-B. Hal ini mengindikasikan bahwa komposisi TiO_2 dalam nanokomposit merupakan parameter

penting yang menentukan efektivitas pemisahan muatan, transfer elektron, dan efisiensi degradasi polutan organik. Data pada Tabel 1 memperlihatkan bahwa metode solvotermal berbasis *green synthesis* memiliki fleksibilitas tinggi dalam menghasilkan TiO_2 dengan berbagai bentuk material, mulai dari nanopowder, material terdoping, hingga nanokomposit. Parameter yang tampak berperan penting meliputi jenis bahan hijau yang digunakan, jenis prekursor titanium, komposisi doping, rasio pembentukan komposit, serta kondisi sintesis yang memengaruhi fase kristal, ukuran partikel, ukuran kristalit, kemurnian, sifat optik, dan performa aplikasi. Temuan-temuan tersebut memperkuat bahwa keberhasilan sintesis TiO_2 tidak hanya ditentukan oleh terbentuknya fase anatase atau rutile, tetapi juga oleh kemampuan parameter sintesis dalam mengontrol struktur nano dan meningkatkan fungsi material untuk aplikasi fotokatalitik maupun konversi energi.

Tabel 2. Parameter sintesis hijau TiO2 berbasis metode solvotermal dan karakteristik yang dihasilkan

Jenis prekursor	Konsentrasi prekursor	Jenis pelarut	Jenis ekstrak hijau	Konsentrasi ekstrak	Suhu Solvotermal	Waktu Pengadukan (min)	Morfologi	Ukuran Partikel	Ukuran Kristal (nm)	Ref.
Titanium isopropoxide	100 mg in 1 mL	Air deionisasi	Kulit pisang	75 g dengan 150 mL	100 °C	60	Bulat menggumpal	25,41 nm	10.48 - 20.49	(Zaidan dkk., 2022)
Titanium isopropoxide	100 mg in 1 mL	Air deionisasi	Kulit pisang dan KOH	80 g dengan 150 mL	100 °C	60	Bulat menggumpal dan tidak seragam	53,48 nm	0,96-18.6	(Challoob dkk., 2024)
Titanium isopropoxide	47 mL	Etanol, dan Dietilamina	Daun Ara	20 g dengan 150 mL	100 °C	30	Aglomerasi (bulat)	50-100 nm	12.6-13.4	(Sharif dkk., 2023)
Titanium (IV) n-butoxide	50 mL	Etanol dan DI Water	Daun Ziziphus jujube	10 g dengan 250 mL	160 °C	720	Sferis dengan g-C_3N_4 yang menempel	50-100 nm	11.56 -31.9	(Abdallah dkk., 2025)

1. Variasi Prekursor, Pelarut, dan Ekstrak Hijau pada Sintesis Solvotermal Karakteristik

Selanjutnya, parameter teknis sintesis dari setiap artikel, meliputi jenis prekursor, pelarut, ekstrak hijau, suhu solvotermal, waktu pengadukan, morfologi, ukuran partikel, dan ukuran kristal, dirangkum secara komparatif pada Tabel 2 untuk mendukung analisis

hubungan antara parameter *green synthesis* dan karakteristik TiO_2 yang dihasilkan. Tabel 2 menyajikan perbandingan parameter *green synthesis* TiO_2 berbasis metode solvotermal yang digunakan dalam empat studi terpilih. Parameter yang dibandingkan meliputi jenis prekursor titanium, konsentrasi prekursor, jenis pelarut, sumber ekstrak hijau, konsentrasi ekstrak, suhu solvotermal, waktu pengadukan, morfologi, ukuran partikel, dan ukuran kristal. Secara umum, data pada tabel memperlihatkan bahwa variasi prekursor, komposisi pelarut, jenis ekstrak tanaman, serta kondisi sintesis memberikan pengaruh langsung terhadap pembentukan morfologi, ukuran partikel, dan ukuran kristal TiO_2 yang dihasilkan.

Dari aspek prekursor, sebagian besar studi menggunakan titanium isopropoxide sebagai sumber titanium utama. Zaidan dkk., (2022) dan Challoob dkk., (2024) menggunakan titanium isopropoxide dengan konsentrasi 100 mg dalam 1 mL, sedangkan Sharif dkk., (2023) menggunakan titanium isopropoxide dalam volume lebih besar, yaitu 47 mL. Berbeda dari ketiga studi tersebut, Abdallah dkk., (2025) menggunakan titanium (IV) n-butoxide sebanyak 50 mL sebagai prekursor TiO_2. Perbedaan jenis dan jumlah prekursor ini penting karena prekursor titanium berperan sebagai sumber ion Ti yang akan mengalami reaksi hidrolisis, kondensasi, nukleasi, dan pertumbuhan kristal selama proses solvotermal. Dengan demikian, jenis prekursor dapat memengaruhi laju pembentukan inti kristal, ukuran kristal, serta keseragaman morfologi material akhir.

Jenis pelarut yang digunakan juga menunjukkan variasi antarstudi. Zaidan dkk., (2022), dan Challoob dkk., (2024) menggunakan air deionisasi sebagai pelarut utama, sedangkan Sharif dkk., (2023) menggunakan campuran etanol dan dietilamina. Abdallah dkk., (2025) menggunakan kombinasi etanol dan DI water. Perbedaan sistem pelarut ini dapat memengaruhi kelarutan prekursor, laju hidrolisis, stabilitas suspensi, dan proses aglomerasi partikel. Penggunaan air deionisasi cenderung menghasilkan sistem sintesis yang lebih sederhana dan ramah lingkungan, sedangkan penambahan etanol atau dietilamina dapat membantu mengontrol reaksi prekursor dan pembentukan struktur nano. Namun, pada beberapa kasus, penggunaan pelarut campuran tetap menghasilkan partikel dengan kecenderungan aglomerasi, sebagaimana terlihat pada morfologi TiO_2 yang dilaporkan oleh Sharif dkk., (2023). Dari sisi sumber ekstrak hijau, setiap studi menggunakan bahan hayati yang berbeda. Zaidan dkk., (2022) menggunakan kulit pisang sebanyak 75 g dalam 150 mL, sedangkan Challoob dkk., (2024) menggunakan kulit pisang dan KOH dengan komposisi 80 g dalam 150 mL. Sharif dkk., (2023) menggunakan ekstrak daun ara sebanyak 20 g dalam 150 mL, sementara Abdallah dkk., (2025) menggunakan daun *Ziziphus jujube* sebanyak 10 g dalam

250 mL. Variasi jenis dan konsentrasi ekstrak hijau ini menunjukkan bahwa bahan alam berperan sebagai komponen penting dalam proses *green synthesis*, baik sebagai agen penstabil, pengarah pertumbuhan, maupun pendukung pembentukan nanopartikel. Senyawa bioaktif dalam ekstrak tanaman, seperti polifenol, flavonoid, asam organik, dan gugus hidroksil, dapat berkontribusi dalam mengontrol nukleasi dan pertumbuhan partikel TiO_2 selama sintesis.

Kondisi solvotermal yang digunakan relatif beragam, terutama pada suhu dan waktu pengadukan. Tiga studi, yaitu Zaidan dkk., (2022), Challoob dkk., (2024), dan Sharif dkk., (2023), menggunakan suhu solvotermal 100 °C, sedangkan Abdallah dkk., (2025) menggunakan suhu lebih tinggi, yaitu 160 °C. Waktu pengadukan juga berbeda, mulai dari 30 menit pada Sharif dkk., (2023), 60 menit pada Zaidan dkk., (2022) dan Challoob dkk., (2024), hingga 720 menit pada Abdallah dkk., (2025). Perbedaan ini menunjukkan bahwa suhu dan durasi proses merupakan parameter penting dalam mengatur pertumbuhan kristal dan pembentukan morfologi. Suhu solvotermal yang lebih tinggi dan waktu pengadukan yang lebih lama dapat memberikan energi yang lebih besar untuk pertumbuhan kristal, tetapi juga dapat meningkatkan kemungkinan aglomerasi atau pembentukan partikel yang lebih besar jika proses pertumbuhan tidak dikontrol dengan baik. Karakteristik morfologi yang dihasilkan menunjukkan kecenderungan dominan berupa bentuk bulat atau sferis dengan tingkat aglomerasi yang berbeda. Zaidan dkk., (2022) menghasilkan TiO_2 dengan morfologi bulat menggumpal, sedangkan Challoob dkk., (2024) melaporkan morfologi bulat menggumpal dan tidak seragam. Sharif dkk., (2023) juga menunjukkan morfologi aglomerasi berbentuk bulat. Sementara itu, Abdallah dkk., (2025) melaporkan morfologi sferis dengan g-C_3N_4 yang menempel pada permukaan TiO_2. Pola ini memperlihatkan bahwa aglomerasi masih menjadi karakter umum dalam sintesis TiO_2 berbasis metode solvotermal, terutama ketika partikel nano memiliki energi permukaan tinggi dan cenderung bergabung untuk menurunkan energi sistem.

Ukuran partikel yang dihasilkan berada dalam rentang nanometer, tetapi menunjukkan variasi yang cukup jelas antarstudi. Ukuran partikel terkecil dilaporkan oleh Zaidan dkk., (2022), yaitu 25,41 nm, dengan penggunaan titanium isopropoxide, air deionisasi, kulit pisang, suhu 100 °C, dan waktu pengadukan 60 menit. Challoob dkk., (2024), dengan sistem yang relatif serupa tetapi menggunakan kulit pisang dan KOH, menghasilkan ukuran partikel minimum 53,48 nm. Sharif dkk., (2023) dan Abdallah dkk., (2025) menghasilkan ukuran partikel lebih besar, yaitu sekitar 50–100 nm. Hal ini menunjukkan

bahwa peningkatan kompleksitas sistem sintesis, baik melalui penggunaan pelarut campuran, variasi ekstrak, maupun pembentukan komposit, dapat memengaruhi pertumbuhan dan aglomerasi partikel sehingga menghasilkan ukuran partikel yang lebih besar.

Ukuran kristal TiO_2 juga memperlihatkan variasi yang cukup luas. Zaidan dkk., (2022) melaporkan ukuran kristal 10,48–20,49 nm, sedangkan Challoob dkk., (2024) menghasilkan ukuran kristal 0,96–18,6 nm. Sharif dkk., (2023) menunjukkan ukuran kristal yang relatif sempit, yaitu 12,6–13,4 nm, sementara Abdallah dkk., (2025) menghasilkan rentang ukuran kristal lebih luas, yaitu 11,56–31,9 nm. Perbedaan ukuran kristal ini mengindikasikan bahwa parameter sintesis tidak hanya memengaruhi ukuran partikel secara keseluruhan, tetapi juga menentukan ukuran domain kristalin di dalam partikel. Ukuran partikel yang besar tidak selalu menunjukkan ukuran kristal yang besar, karena satu partikel dapat tersusun atas beberapa kristalit kecil, terutama pada material yang mengalami aglomerasi atau memiliki struktur polikristalin. Berdasarkan pola yang ditampilkan dalam Tabel 2, sistem sintesis berbasis kulit pisang dengan titanium isopropoxide dan air deionisasi pada suhu 100 °C cenderung menghasilkan ukuran partikel yang lebih kecil, terutama pada studi Zaidan dkk., (2022). Sebaliknya, penggunaan ekstrak hijau dengan komposisi berbeda, tambahan KOH, pelarut campuran, waktu pengadukan lebih panjang, atau pembentukan nanokomposit dapat menghasilkan perubahan pada ukuran partikel, ukuran kristal, dan keseragaman morfologi.

PEMBAHASAN

Kajian sistematis ini menunjukkan bahwa parameter *green synthesis* TiO_2 berbasis metode solvotermal berperan penting dalam mengontrol ukuran partikel dan ukuran kristal, tetapi pengaruhnya tidak bersifat tunggal dan linear. Berdasarkan Tabel 1 dan Tabel 2, variasi ukuran partikel TiO_2 berada pada rentang 25,41–100 nm, sedangkan ukuran kristal berada pada kisaran 0,96–31,9 nm. Variasi tersebut mengindikasikan bahwa pembentukan TiO_2 melalui pendekatan solvotermal hijau dikendalikan oleh interaksi simultan antara jenis prekursor, pelarut, ekstrak hijau, konsentrasi ekstrak, suhu reaksi, waktu pengadukan, serta kondisi kimia larutan. Dalam sintesis TiO_2 berbasis ekstrak tanaman, senyawa metabolit sekunder seperti polifenol diketahui berperan dalam pembentukan dan stabilisasi nanopartikel, sehingga dapat memengaruhi ukuran, morfologi, dan stabilitas material yang dihasilkan (Eddy dkk., 2024). Temuan pada Tabel 1 memperlihatkan bahwa studi-studi yang direview bergerak dalam dua kecenderungan utama. Pertama, sintesis TiO_2 murni atau TiO_2

fase campuran anatase–rutile, sebagaimana dilaporkan oleh Zaidan dkk., (2022) dan Challoob dkk., (2024). Kedua, pengembangan TiO_2 termodifikasi melalui doping atau pembentukan nanokomposit, seperti Ag-doped TiO_2 pada Sharif dkk., (2023) dan TiO_2@g-C_3N_4 pada Abdallah dkk., (2025). Perbedaan orientasi ini penting karena ukuran partikel dan ukuran kristal tidak hanya berkaitan dengan karakter struktural material, tetapi juga dengan performa aplikatifnya. TiO_2 berukuran nano memiliki luas permukaan yang lebih besar dan jumlah situs aktif yang lebih tinggi, sehingga banyak dikembangkan untuk fotokatalisis, degradasi polutan, antibakteri, dan konversi energi. Jassal dkk., (2022) juga menegaskan bahwa sintesis hijau TiO_2 banyak dikembangkan karena dapat memanfaatkan komponen biologis, termasuk tanaman dan mikroorganisme, untuk menghasilkan nanopartikel yang relevan bagi berbagai aplikasi lingkungan dan teknologi.

Dari aspek prekursor, Tabel 2 menunjukkan bahwa titanium isopropoxide merupakan prekursor yang paling banyak digunakan, sedangkan titanium (IV) n-butoxide digunakan pada satu studi. Prekursor alkoksida titanium memiliki reaktivitas tinggi terhadap air, sehingga laju hidrolisis dan kondensasinya sangat dipengaruhi oleh pelarut, pH, suhu, serta keberadaan senyawa organik dalam ekstrak hijau. Zaidan dkk., (2022) menghasilkan ukuran partikel terkecil, yaitu 25,41 nm, menggunakan titanium isopropoxide, air deionisasi, ekstrak kulit pisang, suhu 100 °C, dan waktu pengadukan 60 menit. Namun, Challoob dkk., (2024), yang juga menggunakan titanium isopropoxide dengan suhu dan waktu pengadukan yang relatif sama, menghasilkan ukuran partikel lebih besar, yaitu 53,48 nm. Perbedaan ini menunjukkan bahwa jenis prekursor tidak dapat diposisikan sebagai satu-satunya faktor pengendali ukuran partikel; komposisi ekstrak, keberadaan KOH, dan lingkungan reaksi juga berkontribusi terhadap jalur nukleasi, pertumbuhan partikel, dan aglomerasi. Perbandingan antara Zaidan dkk., (2022) dan Challoob dkk., (2024) memberikan indikasi penting bahwa modifikasi lingkungan kimia sintesis dapat mengubah karakter TiO_2 secara signifikan meskipun prekursor dan suhu yang digunakan relatif serupa. Penambahan KOH pada studi Challoob dkk., (2024) kemungkinan meningkatkan kebasaan medium reaksi, mempercepat hidrolisis prekursor, dan mendorong pembentukan inti TiO_2 secara lebih cepat. Namun, apabila pembentukan inti yang cepat tidak diimbangi oleh stabilisasi permukaan yang efektif, partikel yang terbentuk dapat mengalami penggumpalan dan menghasilkan morfologi yang kurang seragam. Hal ini sesuai dengan data morfologi pada Tabel 2, di mana Challoob dkk., (2024) melaporkan bentuk bulat menggumpal dan tidak seragam. Dengan demikian, ukuran

partikel yang lebih besar pada sistem tersebut dapat dipahami sebagai konsekuensi dari interaksi antara pH, laju hidrolisis, dan kecenderungan aglomerasi.

Ekstrak hijau merupakan parameter sentral dalam sintesis TiO_2 berbasis solvotermal karena berfungsi tidak hanya sebagai komponen alami, tetapi juga sebagai pengatur lingkungan reaksi. Tabel 2 menunjukkan penggunaan kulit pisang, kulit pisang dengan KOH, daun ara, dan daun *Ziziphus jujube*. Secara kimia, ekstrak tanaman dapat mengandung polifenol, flavonoid, asam organik, gugus hidroksil, serta senyawa bioaktif lain yang dapat berperan sebagai *capping agent*, *stabilizing agent*, dan pengarah pertumbuhan partikel. Dilika dkk., (2024), misalnya, melaporkan bahwa ekstrak akar *Maerua oblongifolia* dapat bertindak sebagai *capping* dan *reducing agent* dalam sintesis TiO_2, menghasilkan nanopartikel berukuran rata-rata 19,58 nm dengan aktivitas fotokatalitik dan antibakteri yang baik. Meskipun demikian, data dalam Tabel 2 memperlihatkan bahwa penggunaan ekstrak hijau tidak selalu menghasilkan partikel yang lebih kecil. Sharif dkk., (2023) dan Abdallah dkk., (2025), yang masing-masing menggunakan daun ara dan daun *Ziziphus jujube*, menghasilkan ukuran partikel 50–100 nm. Hal ini menunjukkan bahwa efektivitas ekstrak hijau dalam mengontrol ukuran partikel sangat bergantung pada komposisi kimia ekstrak, konsentrasi senyawa aktif, pH, pelarut, dan interaksi ekstrak dengan prekursor titanium. Oleh karena itu, dalam konteks systematic review, pelaporan "jenis ekstrak" saja belum cukup untuk menjelaskan pengaruhnya terhadap ukuran TiO_2. Informasi tambahan seperti pH ekstrak, metode ekstraksi, kandungan fenolik total, kandungan flavonoid total, dan gugus fungsi dominan berdasarkan FTIR perlu dilaporkan agar hubungan antara ekstrak hijau dan ukuran partikel dapat dianalisis secara lebih kuat.

Konsentrasi ekstrak juga menunjukkan pola yang tidak sepenuhnya linear. Zaidan dkk., (2022) menggunakan 75 g kulit pisang dalam 150 mL dan menghasilkan partikel 25,41 nm, sedangkan Challoob dkk., (2024) menggunakan 80 g kulit pisang dalam 150 mL tetapi menghasilkan partikel lebih besar, yaitu 53,48 nm. Abdallah dkk., (2025) menggunakan 10 g daun *Ziziphus jujube* dalam 250 mL dan menghasilkan partikel 50–100 nm. Pola ini menunjukkan bahwa peningkatan massa bahan hijau tidak secara otomatis menurunkan ukuran partikel. Pada konsentrasi tertentu, ekstrak tanaman dapat membantu menstabilkan inti partikel; namun, pada kondisi lain, kandungan organik yang tinggi dapat meningkatkan viskositas medium, memperkuat interaksi antarpartikel, atau memfasilitasi pembentukan agregat organik-anorganik. Dengan demikian, konsentrasi ekstrak perlu dipahami sebagai parameter kimia yang terkait dengan jumlah senyawa aktif, bukan semata-mata sebagai massa

bahan tanaman per volume pelarut. Jenis pelarut juga menjadi faktor penting dalam pembentukan ukuran partikel dan ukuran kristal. Zaidan dkk., (2022) dan Challoob dkk., (2024) menggunakan air deionisasi, sedangkan Sharif dkk., (2023) menggunakan etanol dan dietilamina, serta Abdallah dkk., (2025) menggunakan etanol dan DI water. Air deionisasi mendukung hidrolisis prekursor alkoksida secara langsung, sedangkan etanol dapat memperlambat hidrolisis dan membantu dispersi prekursor. Dietilamina dapat memodifikasi pH dan memengaruhi proses kondensasi jaringan Ti–O–Ti. Sharif dkk., (2023) menghasilkan ukuran kristal relatif sempit, yaitu 12,6–13,4 nm, tetapi ukuran partikelnya tetap berada pada rentang 50–100 nm. Hal ini menunjukkan bahwa pelarut dapat membantu mengontrol ukuran domain kristalin, tetapi belum tentu mampu mencegah aglomerasi pada skala partikel.

Perbedaan antara ukuran partikel dan ukuran kristal menjadi aspek metodologis yang penting dalam kajian ini. Ukuran partikel umumnya diperoleh dari SEM atau TEM, sedangkan ukuran kristal biasanya dihitung dari pelebaran puncak XRD menggunakan persamaan Scherrer. Oleh karena itu, ukuran partikel yang lebih besar tidak selalu berarti ukuran kristal juga lebih besar. Pada Sharif dkk., (2023), ukuran partikel 50–100 nm disertai ukuran kristal 12,6–13,4 nm, menunjukkan bahwa partikel yang diamati kemungkinan tersusun atas beberapa kristalit kecil. Pola serupa juga terlihat pada Abdallah dkk., (2025), yang melaporkan ukuran partikel 50–100 nm dengan ukuran kristal 11,56–31,9 nm. Fenomena ini lazim terjadi pada nanopartikel TiO_2 karena energi permukaan yang tinggi dapat mendorong partikel-partikel kecil untuk beragregasi, meskipun domain kristal penyusunnya tetap berukuran nano. Suhu solvotermal dan waktu pengadukan turut memengaruhi pertumbuhan kristal dan homogenitas ukuran. Tiga studi menggunakan suhu 100 °C, sedangkan Abdallah dkk., (2025) menggunakan suhu 160 °C dengan waktu pengadukan 720 menit. Suhu yang lebih tinggi dan durasi proses yang lebih panjang dapat menyediakan energi termal yang lebih besar untuk reorganisasi atom, peningkatan kristalinitas, dan pertumbuhan kristalit. Namun, kondisi tersebut juga dapat memperlebar distribusi ukuran kristal apabila pertumbuhan berlangsung tidak seragam. Hal ini terlihat pada Abdallah dkk., (2025), yang menghasilkan rentang ukuran kristal paling luas, yaitu 11,56–31,9 nm. Dengan demikian, suhu dan waktu proses berperan sebagai parameter kinetik yang menentukan keseimbangan antara nukleasi, pertumbuhan kristal, dan aglomerasi partikel.

Fase kristal juga perlu dibahas dalam kaitannya dengan ukuran kristal. Tabel 1 menunjukkan bahwa beberapa studi menghasilkan TiO_2 fase campuran anatase–rutile. Keberadaan fase campuran ini penting karena anatase dan rutile memiliki struktur kristal dan

sifat elektronik yang berbeda. Hanaor & Sorrell, (2011) menjelaskan bahwa anatase dan rutile merupakan dua polimorf utama TiO_2 yang sangat memengaruhi performa fotokatalitik, sedangkan transformasi anatase menuju rutile dipengaruhi oleh suhu, ukuran partikel, dopan, atmosfer, dan kondisi sintesis. Dalam konteks Tabel 1, fase anatase–rutile pada Zaidan dkk., (2022) dan Challoob dkk., (2024) menunjukkan bahwa pendekatan solvotermal hijau mampu menghasilkan TiO_2 polikristalin. Namun, rasio anatase/rutile, ukuran kristal masing-masing fase, dan distribusi antarfase masih perlu dilaporkan secara lebih rinci karena ketiga aspek tersebut menentukan efisiensi pemisahan muatan dan aktivitas fotokatalitik.

Pada studi Sharif dkk., (2023), pengendalian ukuran kristal dikombinasikan dengan rekayasa elektronik melalui doping Ag. Ukuran kristal Ag-doped TiO_2 yang relatif stabil, yaitu sekitar 13 nm, menunjukkan bahwa penambahan Ag tidak menyebabkan pertumbuhan kristalit secara berlebihan. Namun, peningkatan efisiensi DSSC dari 0,62% pada TiO_2 murni menjadi 2,45% pada Ag-doped TiO_2 4% menunjukkan bahwa performa material tidak hanya ditentukan oleh ukuran kristal. Ag dapat meningkatkan transfer muatan, menekan rekombinasi elektron, dan memperbaiki karakter elektronik fotoanoda. Studi Sharif dkk., (2023) sendiri menegaskan bahwa ion Ag menarik untuk aplikasi DSSC karena stabilitasnya, kemampuannya menurunkan rekombinasi muatan, serta kontribusinya terhadap peningkatan transfer muatan. Studi Abdallah dkk., (2025) menunjukkan bahwa pengembangan TiO_2 melalui pembentukan nanokomposit TiO_2@g-C_3N_4 menghasilkan hubungan yang lebih kompleks antara ukuran partikel, ukuran kristal, dan performa fotokatalitik. Meskipun ukuran partikelnya berada pada rentang 50–100 nm, aktivitas fotokatalitiknya tetap tinggi, dengan degradasi Bisphenol A sebesar 71% dan Malathion sebesar 74%. Hal ini menunjukkan bahwa ukuran partikel terkecil tidak selalu menjadi satu-satunya indikator performa terbaik. Pada sistem komposit, keberadaan heterostruktur TiO_2/g-C_3N_4 dapat meningkatkan pemisahan pasangan elektron–hole, memperluas respons cahaya, dan memperbaiki efisiensi transfer muatan. Kumar dkk., (2021) juga melaporkan bahwa konstruksi heterostruktur Z-scheme g-C_3N_4/TiO_2 dapat meningkatkan degradasi polutan berbahaya melalui peningkatan pemisahan pembawa muatan.

Berdasarkan sintesis bukti dari Tabel 1 dan Tabel 2, pendekatan *green solvothermal synthesis* TiO_2 perlu ditempatkan sebagai sistem reaksi terpadu yang mencakup dimensi kimia, termal, struktural, dan aplikatif. Penggunaan ekstrak tanaman memberikan kontribusi penting dalam mendukung prinsip sintesis hijau, tetapi karakter keberlanjutan proses tidak

hanya ditentukan oleh keberadaan bahan alami. Evaluasi yang lebih komprehensif perlu mempertimbangkan jenis prekursor, jenis pelarut, penggunaan basa atau aditif kimia, suhu proses, durasi sintesis, konsumsi energi, residu reaksi, serta potensi skalabilitas. Dengan kerangka tersebut, sintesis hijau tidak diposisikan sekadar sebagai penggunaan ekstrak tanaman, melainkan sebagai strategi desain material yang berupaya menyeimbangkan efisiensi sintesis, kontrol struktur nano, dan keberlanjutan proses. Secara kritis, kajian ini juga menemukan bahwa komparasi antarstudi masih dibatasi oleh ketidakterstandaran pelaporan parameter sintesis. Setiap artikel menggunakan kombinasi variabel yang berbeda, sehingga pengaruh tunggal dari prekursor, pelarut, ekstrak, suhu, atau waktu pengadukan belum dapat ditentukan secara definitif. Perubahan jenis ekstrak sering terjadi bersamaan dengan perubahan pelarut, konsentrasi prekursor, suhu, waktu pengadukan, dan jenis material akhir. Akibatnya, hubungan antara parameter sintesis dan ukuran partikel masih bersifat indikatif, bukan kausal langsung. Untuk memperkuat kajian di masa mendatang, studi green synthesis TiO_2 berbasis solvotermal perlu melaporkan parameter yang lebih terstandar, meliputi pH larutan, rasio prekursor terhadap pelarut, konsentrasi ekstrak berbasis senyawa aktif, kondisi autoklaf, waktu solvotermal aktual, metode pengukuran ukuran partikel, serta metode perhitungan ukuran kristal.

KESIMPULAN

Systematic review ini menunjukkan bahwa parameter *green synthesis* berbasis metode solvotermal memiliki peran penting dalam menentukan ukuran partikel dan ukuran kristal TiO_2. Berdasarkan artikel yang dianalisis, variasi ukuran partikel berada pada rentang 25,41–100 nm, sedangkan ukuran kristal berada pada kisaran 0,96–31,9 nm. Perbedaan tersebut dipengaruhi oleh kombinasi parameter sintesis, terutama jenis prekursor titanium, jenis pelarut, sumber ekstrak hijau, konsentrasi ekstrak, suhu solvotermal, dan waktu proses. Penggunaan titanium isopropoxide dengan air deionisasi dan kulit pisang pada suhu 100 °C menghasilkan ukuran partikel terkecil, sementara variasi pelarut, penambahan KOH, doping Ag, dan pembentukan komposit TiO_2@g-C_3N_4 menghasilkan perubahan pada morfologi, ukuran kristal, serta performa material. Temuan ini menunjukkan bahwa pengendalian ukuran TiO_2 tidak dapat dijelaskan oleh satu parameter tunggal, tetapi merupakan hasil interaksi antara proses hidrolisis, nukleasi, pertumbuhan kristal, stabilisasi permukaan, dan aglomerasi partikel.

Selain itu, hasil review memperlihatkan bahwa ukuran partikel terkecil tidak selalu menjadi satu-satunya indikator kualitas material terbaik. Pada sistem Ag-doped TiO_2 dan TiO_2@g-C_3N_4, peningkatan performa lebih banyak dipengaruhi oleh rekayasa muatan, struktur elektronik, dan pembentukan heterostruktur. Dengan demikian, optimasi *green solvothermal synthesis* TiO_2 perlu diarahkan tidak hanya pada reduksi ukuran partikel, tetapi juga pada pengendalian ukuran kristal, fase kristal, morfologi, kemurnian, dan struktur antarmuka. Kajian ini juga mengindikasikan perlunya standardisasi pelaporan parameter sintesis, khususnya pH larutan, rasio prekursor terhadap pelarut, kandungan senyawa aktif dalam ekstrak hijau, waktu solvotermal aktual, dan metode pengukuran ukuran partikel maupun ukuran kristal, agar perbandingan antarstudi dapat dilakukan secara lebih kuat dan reproducible.

Ucapan Terimakasih

This research was supported by Universitas Mataram under Contract Number 2282/UN18.L1/PP/2025 PDP on behalf of Kormil Saputra. The author gratefully acknowledges this support.

DAFTAR PUSTAKA

Abdallah, S. S., Maridevaru, M. C., Marzouqi, F. A., & Selvaraj, R. (2025). Green synthesis of TiO_2@g-C_3N_4 nanocomposites for the photocatalytic degradation of pesticides and toxic organics present in water and wastewater. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, 459*, 116015. https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2024.116015

Bian, Z., Huo, Y., & Li, H. (2016). Novel titanium oxide materials synthesized by solvothermal and supercritical fluid processes. In H. Yamashita & H. Li (Eds.), *Nanostructured photocatalysts* (pp. 3–21). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-26079-2_1

Challoob, D. M., Khdiar, M. Y., & Hammadi, O. A. (2024). Highly pure titanium dioxide nanopowders synthesized by eco-friendly solvothermal method. *Iraqi Journal of Applied Physics, 20*(2B), 381–386. https://ijap-iq.com/index.php/ijap/article/view/50

Dilika, M. D., Fanta, G. M., & Tański, T. (2024). Green synthesis of titanium dioxide nanoparticles using *Maerua oblongifolia* root bark extract: Photocatalytic degradation and antibacterial activities. *Materials, 17*(23), 5835. https://doi.org/10.3390/ma17235835

Eddy, D. R., Rahmawati, D., Permana, M. D., Takei, T., Solihudin, Suryana, Noviyanti, A. R., & Rahayu, I. (2024). A review of recent developments in green synthesis of TiO_2 nanoparticles using plant extract: Synthesis, characterization and photocatalytic

activity. *Inorganic Chemistry Communications, 165*, 112531. https://doi.org/10.1016/j.inoche.2024.112531

Hanaor, D. A. H., & Sorrell, C. C. (2011). Review of the anatase to rutile phase transformation. *Journal of Materials Science, 46*(4), 855–874. https://doi.org/10.1007/s10853-010-5113-0

Ibrahim, S. A., & Sreekantan, S. (2010). Effect of annealing atmosphere towards TiO_2 nanoparticles on their photocatalytic performance in aqueous phase. In *2010 International Conference on Enabling Science and Nanotechnology (ESciNano)* (pp. 1–2). IEEE. https://doi.org/10.1109/ESCINANO.2010.5701011

Jassal, P. S., Kaur, D., Prasad, R., & Singh, J. (2022). Green synthesis of titanium dioxide nanoparticles: Development and applications. *Journal of Agriculture and Food Research, 10*, 100361. https://doi.org/10.1016/j.jafr.2022.100361

Karpovich, N. F., Pugachevskij, M. A., & Shtarev, D. S. (2013). The influence of the solvent on the shape of the titanium dioxide crystals during the solvothermal autoclave synthesis. *Applied Mechanics and Materials, 377*, 186–190. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.377.186

Kumar, A., Sharma, G., Kumari, A., Guo, C., Naushad, M., Vo, D.-V. N., Iqbal, J., & Stadler, F. J. (2021). Construction of dual Z-scheme g-C_3N_4/$Bi_4Ti_3O_{12}$/$Bi_4O_5I_2$ heterojunction for visible and solar powered coupled photocatalytic antibiotic degradation and hydrogen production: Boosting via $I-/I_3-$ and Bi^3+/Bi^5+ redox mediators. *Applied Catalysis B: Environmental, 284*, 119808. https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2020.119808

Lestari, D., & Masriah, I. (2025). Recent advances in green synthesis of TiO_2 nanoparticles: Mechanisms, and applications. *Research in Chemical Engineering (RiCE), 4*(2), 89–104. https://doi.org/10.30595/rice.v4i2.316

Mamaziyayeva, S., Avazova, N., Tashmatova, R., Mukhamadiev, N., Mukhamadiev, A., & Uzokov, J. (2025). Synthesis of nano titanium oxide and dependence of its photocatalytic properties on particle size. *2022-Yil 3-Son (133/1) Aniq Fanlar Seriyasi, 1*(3), 94–100. https://axborotnoma.uz/research/3568

Nematov, D. (2024). Titanium dioxide and photocatalysis: A detailed overview of the synthesis, applications, challenges, advances and prospects for sustainable development. *Journal of Modern Green Energy, 3*, 6. https://doi.org/10.53964/jmge.2024006

Roca, R. A., & Leite, E. R. (2013). Size and shape tailoring of titania nanoparticles synthesized by solvothermal route in different solvents. *Journal of the American Ceramic Society, 96*(1), 96–102. https://doi.org/10.1111/jace.12078

Selvi, J. M., Murugalakshmi, M., Sami, P., Gnanaprakash, M., & Thanalakshmi, R. (2022). Green synthesis, characterization and applications of TiO_2 nanoparticles using aqueous extract of *Erythrina variegata* leaves. *Current Science, 123*(1), 59–66. https://doi.org/10.18520/cs/v123/i1/59-66

Sharif, A. M., Ashrafuzzaman, M., Kalam, A., Al-Sehemi, A. G., Yadav, P., Tripathi, B., Dubey, M., & Du, G. (2023). Green synthesis of pristine and Ag-doped TiO_2 and investigation of their performance as photoanodes in dye-sensitized solar cells. *Materials, 16*(17), 5731. https://doi.org/10.3390/ma16175731

Stride, J. A., & Tuong, N. T. (2010). Controlled synthesis of titanium dioxide nanostructures. *Solid State Phenomena, 162*, 261–294. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.162.261

Syngelakis, I., Aivalioti, C., Aperathitis, E., Kenanakis, G., Tzortzakis, S., Klini, A., & Farsari, M. (2023). 3D microstructures of TiO_2 for applications in photocatalysis. In *2023 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC)* (pp. 1–1). IEEE. https://doi.org/10.1109/CLEO/Europe-EQEC57999.2023.10231418

Zaidan, Z. H., Mahmood, Q. H., & Hammadi, O. A. (2022). Using banana peels for green synthesis of mixed-phase titanium dioxide nanopowders. *Iraqi Journal of Applied Physics, 18*(4), 27–30. https://ijap-iq.com/index.php/ijap/issue/view/70/12

Zhang, W., Wang, S., Zhao, J., Liu, H., Chen, S., & Li, Z. (2025). Study on the hydrolysis and crystallization mechanism of nano-titanium dioxide based on supercritical hydrothermal synthesis. *Nanotechnology, 36*(45), 455601. https://doi.org/10.1088/1361-6528/ae17d4

Zulfiqar, U., Akhtar, K., Javed, Y., Noor, A., Abbas, T., & Naseer, M. T. (2025). Synthesis and characterization of titanium oxide nanomaterials for potential photocatalytic applications. *Annual Methodological Archive Research Review, 3*(9), 102–108. https://amresearchjournal.com/index.php/Journal/article/view/732