

REVIEW: *GREEN SYNTHESIS* NANOPARTIKEL TiO₂ SEBAGAI MATERIAL FOTOKATALIS

¹⁾Soffin Harjasa Setiawan Okto, ²⁾Munasir

¹⁾Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: soffin.19011@mhs.unesa.ac.id

²⁾Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: munasir_physics@unesa.ac.id

Abstrak

Nanopartikel TiO₂ merupakan material yang baik digunakan sebagai fotokatalis, hal ini dibuktikan dengan berbagai penelitian yang telah berhasil. Adapun metode sintesis dan ramah lingkungan yaitu dengan metode *green synthesis*. Metode *green synthesis* telah menarik perhatian para ilmuwan karena proses yang ramah lingkungan dengan pereduksi yang berasal dari ekstrak tanaman. Berbagai macam ekstrak tanaman yang telah berhasil disintesis diantaranya daun juwet, kulit lemon, daun Malaka, akar tarum, jeruk nipis, gel aloe vera, daun lidah buaya dan daun pagar jarak. Hasil dari nanopartikel tersebut telah sesuai dengan standart TiO₂ melalui karakterisasi XRD, FTIR, SEM, TEM dan UV-Vis. Nanopartikel TiO₂ yang baik memiliki ukuran partikel yang kecil dan energi band gap yang kecil, dapat diketahui dari SEM, TEM dan UV-Vis. Selain itu, nanopartikel TiO₂ yang disintesis menggunakan ekstrak tanaman juga telah berhasil dimanfaatkan sebagai fotokatalis dalam mengurangi konsentrasi polutan diantaranya timbal (Pb), rhodamine B, coralline red, metilen biru, metilen oren, asam pikrat dan *treated municipal wastewater* (TWW). Dalam proses degradasi nanopartikel TiO₂ dapat mencapai hingga 99%, dengan begitu nanopartikel TiO₂ yang telah disintesis menggunakan *green synthesis* berhasil dimanfaatkan dalam aktivitas fotokatalis.

Kata Kunci: *Nanopartikel TiO₂, Green synthesis, Fotokatalis*

Abstract

TiO₂ nanoparticles are a good material to use as a photocatalyst, this has been proven by various successful studies. The synthetic and environmentally friendly method is the *green synthesis* method. The *green synthesis* method has attracted the attention of scientists because it is an environmentally friendly process with reducing agents derived from plant extracts. Various kinds of plant extracts that have been successfully synthesized include juwet leaves, lemon peel, Malacca leaves, tarum root, lime juice, aloe vera gel, aloe vera leaves and jatropha leaves. The results of these nanoparticles comply with the TiO₂ standard through XRD, FTIR, SEM, TEM and UV-Visible characterization. TiO₂ nanoparticles have a small particle size and a small band gap energy, which can be seen from SEM, TEM and UV-Vis. In addition, TiO₂ nanoparticles synthesized using plant extracts have also been successfully used as photocatalysts in reducing pollutant concentrations including lead (Pb), rhodamine B, coralline red, methylene blue, methylene orange, picric acid and *treated municipal wastewater* (TWW). In the process of degradation of TiO₂ nanoparticles it can reach up to 99%, so that TiO₂ nanoparticles that have been synthesized using *green synthesis* are successfully utilized in photocatalyst activities.

Keywords: *TiO₂ Nanoparticles, Green synthesis, Photocatalyst.*

I. PENDAHULUAN

Pengolahan air limbah dalam industri merupakan teknologi yang penting dalam kehidupan sehari-hari manusia dan lingkungan secara global. Pencemaran air merupakan permasalahan yang cukup besar, karena mengandung senyawa organik dan anorganik dengan konsentrasi yang cukup tinggi pada hampir setiap prosesnya. Akibatnya, kualitas air menurun karena tercampur dengan limbah cair tersebut. Adapun permasalahan dalam limbah cair diantaranya logam timbal (Pb), Rhodamin B, Coralline red, metilen biru, metilen oren dan asam pikrat. Beberapa penelitian untuk mengatasi pengolahan air limbah telah dilakukan. Penggunaan fotokatalis merupakan salah satu cara yang efektif dalam pengolahan limbah cair. Fotokatalis mengubah energi cahaya menjadi energi kimia dan dalam prosesnya akan menghasilkan radikal hidroksil yang akan bereaksi redoks dengan senyawa organik (polutan), sehingga air akan kembali jernih karena terpisahkan dari limbah cair (Suahya et al., 2016). Untuk proses berlangsungnya fotokatalis memerlukan material semikonduktor dalam bentuk nanomaterial.

Nanomaterial merupakan material yang partikelnya memiliki ukuran dalam skala nanometer yaitu berkisar antara 1-100 nanometer. Sifat fisis dan kimia yang dimiliki oleh nanomaterial adalah lebih unggul bila dibandingkan dengan sifat bulk material, hal ini disebabkan meningkatnya fraksi permukaan atom akibat berkurangnya ukuran partikel (Widiana & Astuti, 2021). Nanopartikel semakin banyak digunakan dalam kehidupan sehari-hari diantaranya dalam bidang medis, tata rias, farmasi, dan pencemaran air. Karena nanopartikel memiliki karakteristik termal, optik, listrik, dan magnetiknya yang menarik (Verma et al., 2022). Salah satu material nanopartikel yang menarik para peneliti saat itu yaitu nanopartikel titanium dioksida (TiO_2). Nanopartikel TiO_2 adalah semikonduktor yang bersifat tidak toksik, inert dan harganya murah, sehingga banyak diaplikasikan dalam kehidupan sehari-hari. TiO_2 mempunyai tiga jenis bentuk kristal diantaranya: rutil (tetragonal), anatase (tetragonal), dan brookite (ortorombik) (Rahman et al., 2014). Diantara ketiganya, TiO_2 kebanyakan berada dalam bentuk rutil dan anatase dimana kedua bentuk ini mempunyai struktur tetragonal. Secara termodinamik struktur kristal anatase lebih stabil dibandingkan rutil (Dastan & Chaure, 2014).

Titanium dioksida merupakan material oksida yang memiliki beberapa keunggulan diantaranya memiliki sifat optik yang baik, aktivitas fotokatalis yang baik, superhidrofilik, ramah lingkungan serta stabilitas mekanik yang tinggi (Agustania et al., 2022). Sedangkan berdasarkan ukurannya, secara termodinamika anatase lebih stabil dan memiliki ukuran kristal kurang dari 11 nm, brookite antara 11 dan 35 nm, dan rutil lebih dari 35 nm (Wang et al., 2011). TiO_2 anatase merupakan material nanopartikel yang menjanjikan karena tidak beracun, stabil, tidak berbahaya dan murah (Gabryelle et al., 2023). TiO_2 memiliki stabilitas kimia yang baik, adsorpsi yang baik di daerah ultraviolet, transparansi tinggi pada cahaya tampak (Rasheed, 2017). Sehingga dapat dimanfaatkan sebagai material fotokatalis untuk penjernihan air limbah (Wulandari et al., 2018). Nanopartikel TiO_2 dapat disintesis dengan berbagai metode. Adapun metode yang ramah lingkungan yaitu dengan metode *green synthesis*, dimana ekstrak tanaman dapat digunakan sebagai pereduksi pada metode ini.

Green synthesis merupakan peran dalam rekayasa dalam bidang sains saat ini. Sebagai hasil dari sifat khas dari material nano yang akan digunakan untuk pengolahan air dan situs yang terkontaminasi. Partikel nano sangat menarik karena memiliki ciri yang khusus, seperti ukurannya yang sangat kecil, permukaan yang tinggi rasio luas terhadap volume, kemampuan modifikasi permukaan, dan sifat yang bergantung pada ukuran. Berbagai aplikasi pada nanopartikel seperti pada bidang medis dan farmasi. Saat ini, penelitian besar-besaran sedang dilakukan pada sistem biologis. Sintesis biologis nanomaterial menggunakan bakteri, jamur, khamir, dan tumbuhan. Karena efektivitas biaya, pendekatan *green synthesis* ini telah menjadi perhatian yang luas. Secara biologis nanopartikel yang disintesis memiliki berbagai aplikasi di bidang kontaminan remediasi, serta aktivitas antibakteri, antijamur, fotokatalis, dan fotokimia (Verma et al., 2022).

Nanoteknologi dan bioteknologi, yang berurusan dengan mikroorganisme seperti bakteri, jamur, ragi, ganggang, dan tumbuhan adalah bidang penelitian yang paling menjanjikan. Penggunaan mikroorganisme untuk mensintesis nanopartikel mengungkapkan mekanisme prospektif. Anorganik nanomaterial diproduksi dengan bantuan organisme hidup yang disebutkan di atas, dan mereka menunjukkan hasil yang bagus. Fokus *green synthesis* dengan bantuan ekstrak tumbuhan, dapat membuat nanopartikel menjadi sangat stabil dalam bentuk dan ukuran yang tepat (Sutrisno, 2020). Manfaat lain dari *green synthesis* adalah meminimalisir kemungkinan terkontaminasi. Tumbuhan mengandung banyak fitokimia, yang membantu dalam produksi bahan nano. Tanaman menyediakan berbagai fitokimia yang umumnya digunakan dan tidak mahal dalam sintesis bahan nano dan partikel nano. Fitokimia juga memainkan peran penting karena membantu pada saat aplikasi aktivitas fotokatalis yang dapat membantu dalam reaksi oksidasi dan reduksi pada fotokatalis waktu aktivitas zat warna organik.

Upaya penelitian terbaru dalam topik sintesis nanopartikel TiO₂ menggunakan pereduksi ekstrak tanaman. Juga dapat menggali lebih jauh ke dalam mekanisme *green synthesis* nanopartikel TiO₂ (Saranya et al., 2018). Hasil nanopartikel titanium dioksida dari berbagai sumber biologis seperti tanaman telah dibahas serta mekanisme penyerapan pada tanaman dieksplorasi. Potensi dampak TiO₂ juga telah dilaporkan bahwa *green synthesis* sedang banyak diteliti karena sejumlah keuntungan yang signifikan terkait dengan teknik ini. Pendekatan ini dapat digunakan untuk mengatur struktur kristal, bentuk, dan ukuran dengan menyesuaikan parameter percobaan. Meskipun demikian, hanya beberapa tanaman yang dieksploitasi dalam sintesis nanopartikel TiO₂, sehingga dapat dijadikan sebagai tambahan studi dalam bidang ini. Partikel nano yang disintesis tentu sangat baik dalam bidang fotokatalis, dimana ketika material memiliki struktur semakin kecil maka penyerapan dalam proses fotokatalis semakin meningkat (Yuliana, 2020).

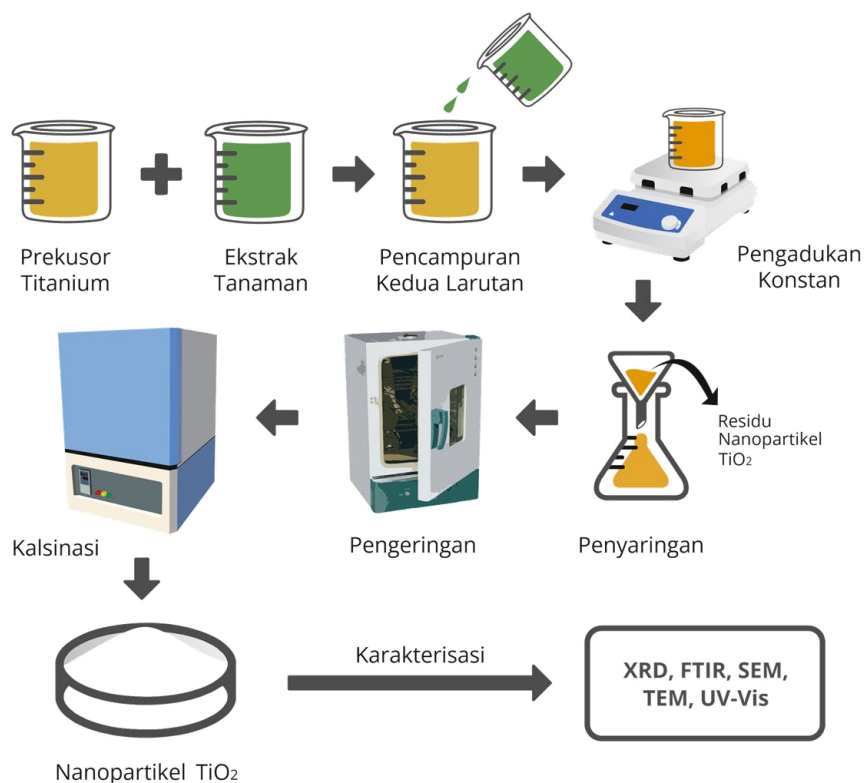
II. MEKANISME GREEN SYNTHESIS NANOPARTIKEL TiO₂

1. Preparasi Ekstrak Tanaman

Daun segar dicuci bersih dengan air suling untuk menghilangkan kotoran yang menempel pada permukaan. Kemudian daun dipotong kecil-kecil dan di keringkan menggunakan oven pada suhu 60°C dan dihaluskan hingga menjadi serbuk halus. Setelah itu mencampurkan serbuk daun dengan aquades dan dipanaskan pada suhu 80°C, pada proses ini suhu di kontrol agar kandungan fitokimia dalam daun tidak rusak dan ekstrak yang diperoleh tetap dapat di reduksi dan di stabilisasi. Setelah tercampur, larutan di pisahkan menggunakan kertas saring. Ekstrak siap digunakan sebagai pereduksi untuk sintesis nanopartikel TiO₂ (Verma et al., 2022).

2. Sintesis Nanopartikel TiO₂

TTIP (titanium-isopropoxide), Ti(OBu)₄ (titanium butoxide), TiCl₄ (titanium tetrachloride) adalah beberapa prekursor yang dapat dimanfaatkan untuk membuat nanopartikel TiO₂. Tergantung pada aplikasinya, sebagian besar partikel TiO₂ dilarutkan dalam etanol atau air suling. Ekstrak yang diperoleh kemudian ditambahkan ke dalam campuran, tetes demi tetes. Setelah itu larutan diaduk terus menerus pada suhu yang sesuai. Munculnya nanopartikel menyebabkan terjadinya pergeseran warna pada larutan. Akhirnya, nanopartikel yang diperoleh disaring, dicuci dengan air suling, dikeringkan dan dikalsinasi. Nanopartikel yang disintesis disimpan dalam tungku untuk kalsinasi pada suhu mulai dari 400°C–800°C untuk menghilangkan kelebihan gugus organik (Verma et al., 2022). Fitokimia pada tanaman sangat penting untuk sintesis nanopartikel TiO₂. Skema *green synthesis* nanopartikel TiO₂ ditunjukkan pada **Gambar 1**.

Gambar 1. Skema Green Synthesis Nanopartikel TiO_2

3. Karakteristik Nanopartikel TiO_2

Karakteristik yang dimiliki nanopartikel TiO_2 dapat diketahui dengan beberapa karakterisasi diantaranya XRD untuk mengetahui ukuran kristalit dari material TiO_2 , UV-Vis untuk mengetahui energi *band gap*, dimana energi band gap ini sangat berpengaruh untuk proses aktivitas fotokatalis (Sharma et al., 2018). Selain itu juga karakterisasi SEM dan TEM untuk mengetahui morfologi serta ukuran dari nanopartikel TiO_2 , dimana ukuran ini sangat penting dalam proses sintesis nanopartikel. Berbagai jenis ekstrak tanaman telah berhasil digunakan sebagai pereduksi nanopartikel TiO_2 seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Ekstrak Tanaman untuk Sintesis Nanopartikel TiO_2

No.	Ekstak Tanaman	Ukuran partikel (nm)	Ukuran kristalit (nm)	Energi <i>band gap</i> (Ev)	Referensi
1.	Daun Juwet (<i>Syzygium cumini</i>) 	11	10	3,4	(Sethy et al., 2020)

No.	Ekstak Tanaman	Ukuran partikel (nm)	Ukuran kristalit (nm)	Energi band gap (Ev)	Referensi
2.	Kulit Lemon (Sitrun) 	100	61,76	3,08	(Nabi et al., 2022)
3.	Daun Malaka (<i>Phyllanthus Emblica</i>) 	22	-	4,55	(Singh et al., 2020)
4.	Daun Akar Tarum (<i>Wrightia tinctoria</i>) 	22	9,93	2,52	(Muthuvel et al., 2021)
5.	Jeruk Nipis (<i>Citrus limetta</i>) 	80	45	3,22	(Nabi et al., 2021)
6.	Gel Aloevera 	13	9	2,9	(Hariharan et al., 2018)

No.	Ekstak Tanaman	Ukuran partikel (nm)	Ukuran kristalit (nm)	Energi band gap (Ev)	Referensi
7.	Daun Lidah Buaya 	50-200	96	3,27	(Sonker et al., 2020)
8.	Daun Pagar Jarak (<i>Jatropha curcas L</i>) 	10-120	13	3,28	(Goutam et al., 2018)

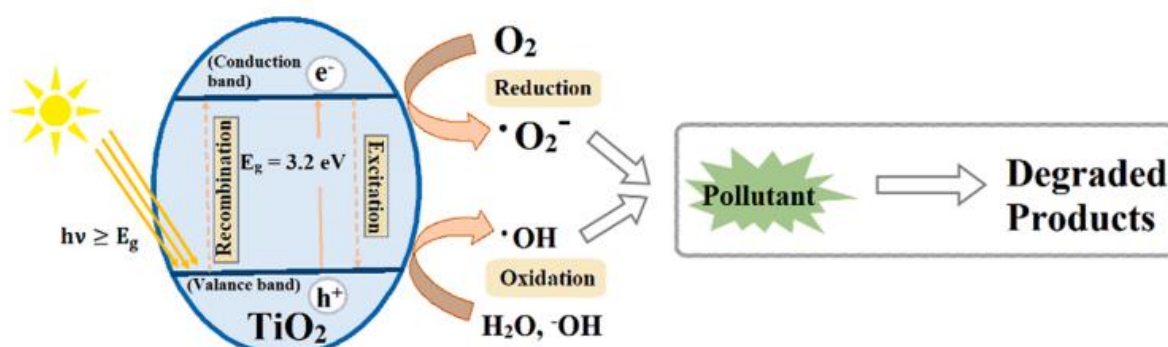
Pada **Tabel 1** di atas dapat dilihat bahwa nanopartikel TiO_2 dapat disintesis dengan berbagai jenis ekstrak tanaman. Hasil sintesis didapatkan ukuran partikel, ukuran kristalit dan energi band gap. Ukuran partikel didapatkan dari karakterisasi SEM dan TEM, ukuran kristalit didapatkan nilai ukuran kristalit pada nanopartikel ukuran kristalit memiliki nilai lebih kecil daripada ukuran partikel dan untuk nilai band gap didapatkan dari karakterisasi UV-Vis. Pada ekstrak daun juwet didapatkan ukuran partikel sebesar 11 nm, ukuran kristalit sebesar 10 nm dan energi band gap sebesar 3,4 eV. Pada ekstrak kulit lemon memiliki ukuran partikel sebesar 100 nm, ukuran kristalit sebesar 61,76 nm dan energi band gap sebesar 3,08 eV. Pada ekstrak daun malaka (*Phyllanthus Emblica*) memiliki ukuran partikel sebesar 22 nm dan energi band gap sebesar 4,55 eV. Pada ekstrak daun akar tarum (*Wrightia tinctoria*) memiliki ukuran partikel sebesar 22 nm, ukuran kristalit 9,93 nm dan energi band gap sebesar 2,52 eV. Pada ekstrak jeruk nipis memiliki ukuran partikel sebesar 80 nm, ukuran kristalit sebesar 45 nm dan energi band gap sebesar 3,22 eV. Pada ekstrak gel aloe vera memiliki ukuran partikel sebesar 13 nm, ukuran kristalit sebesar 9 nm dan energi band gap sebesar 3,22 eV. Pada ekstrak daun lidah buaya memiliki ukuran partikel sebesar 50-200 nm, ukuran kristalit sebesar 96 nm dan energi band gap sebesar 3,27 eV. Pada ekstrak Daun Pagar Jarak (*Jatropha curcas L*) memiliki ukuran partikel sekitar 10-120 nm, ukuran kristalit sebesar 13 nm dan energi band gap sebesar 3,28 eV. Nanopartikel TiO_2 yang baik digunakan sebagai aktivitas fotokatalis ialah yang memiliki ukuran partikel dan ukuran kristalit yang kecil, karena semakin kecil ukurannya maka semakin menyebar material TiO_2 dalam proses fotokatalis sehingga penyerapan terhadap polutan semakin besar, selain itu juga diperlukan energi band gap yang kecil untuk proses penyerapan yang lebih cepat.

III. MEKANISME DAN APLIKASI FOTOKATALIS NANOPARTIKEL TiO_2

1. Mekanisme Fotokatalis Nanopartikel TiO_2

Fotokatalis merupakan proses ramah lingkungan yang melibatkan konversi energi cahaya menjadi energi kimia pada kondisi sekitar (Saranya et al., 2018). Selain itu, fotokatalis juga dikatakan sebagai proses gabungan antara fotoreaksi dan katalis, di mana prosesnya bertujuan untuk mempercepat fotoreaksi dengan adanya katalis. Katalis merupakan zat yang bertujuan untuk

mempercepat laju reaksi yang digunakan dalam proses fotokatalis sehingga mampu mengurangi energi aktivasi zat (Safaat, 2020). TiO_2 adalah katalis semikonduktor yang paling efektif karena mempunyai energi gap relatif besar (3,2 eV) yang cocok digunakan untuk fotokatalis, tidak beracun, dan harganya terjangkau melimpah. Jika katalis semikonduktor dikenai sinar dengan energi yang lebih besar, maka elektron pada pita valensi bereksitasi menuju pita konduksi dan akan meninggalkan hole pada pita valensi. Hole (h^+) akan berinteraksi dengan H_2O dan OH yang berada pada permukaan katalis membentuk OH radikal ($\cdot\text{OH}$) yang bersifat sebagai oksidator kuat. Elektron akan bereaksi dengan O_2 yang berada pada katalis membentuk radikal superoksida yang bersifat sebagai reduktor. Oksidator dan reduktor menyerang zat warna metilen biru sehingga menghasilkan CO_2 dan H_2O serta beberapa asam dengan konsentrasi yang rendah. Mekanisme fotokatalis TiO_2 dapat ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Mekanisme Fotokatalis TiO_2 (Nabi et al., 2021)

Pita valensi memiliki tingkat energi yang lengkap dan diisi dengan elektron, sedangkan pita konduksi memiliki tingkat energi yang tidak terisi dan diisolasi dari pita valensi. Lubang kosong di pita konduksi menerima elektron dari pita valensi. Elektron dalam pita valensi diangkut ke pita konduksi untuk aktivitas fotokatalis nanopartikel TiO_2 . Karena TiO_2 merupakan material semikonduktor maka energi foton yang cukup akan menghasilkan pasangan elektron-lubang. Elektron pada pita valensi berpindah ke pita konduksi dan mengisi lubang ketika terpapar sinar UV dan akan diserap oleh nanopartikel TiO_2 . Elektron akan teraktivasi. Ketika pita konduksi dan lubang pita valensi bereaksi dengan air di lingkungan dan oksigen, spesies oksigen reaktif, radikal hidroksil, dan superoksida ion terbentuk.

2. Aplikasi Fotokatalis Nanopartikel TiO_2

Proses aktivitas fotokatalis dapat diaplikasikan untuk mengolah limbah cair yang mengandung zat organik. Berbagai macam jenis polutan dapat mencemari lingkungan air dan mengakibatkan pencemaran. Berbagai jenis pewarna dan zat berbahaya lainnya memiliki kelarutan yang buruk dan stabilitas tinggi, oleh karena itu dapat menyebabkan ancaman terhadap kehidupan akuatik. Baru-baru ini nanopartikel yang disintesis dengan kemampuan katalitik tinggi dan struktur yang spesifik. Nanopartikel ini juga memiliki luas permukaan yang besar, sehingga dapat menjadikannya katalis heterogen yang baik. Katalis yang berstruktur nano juga memiliki keuntungan karena mudah diperoleh kembali dan didaur ulang dengan campuran reaksi. Sebagai hasil dari stabilitasnya yang tinggi, toksisitas rendah, sifat optik, potensi fotokatalis nanopartikel TiO_2 sebagian besar telah digunakan dalam katalis. Beberapa studi mengklaim bahwa nanopartikel TiO_2 yang disintesis hijau dapat digunakan untuk fotokatalis mengurangi pewarna dan senyawa yang berbahaya diantaranya logam timbal (Pb), Rhodamin B, Coralline red, metilen biru, metilen oranye dan asam pikrat. Tabel 2 menunjukkan kinerja fotokatalis nanopartikel TiO_2 yang disintesis menggunakan berbagai jenis ekstrak tumbuhan.

Tabel 2. Aktivitas fotokatalis nanopartikel TiO₂ menggunakan ekstrak tumbuhan yang berbeda

No.	Polutan	Konsentrasi	Massa katalis	Waktu penyinaran	Persentase degradasi	Ref.
1.	Timbal (Pb)	8 ppm	0,3 g	17jam	82,53%	(Sethy et al., 2020)
2.	Rhodamin B	-	-	120 menit	70%	(Nabi et al., 2022)
3.	Coralline Red	-	5 mg	140 menit	-	(Singh et al., 2020)
4.	Metilen biru dan metilen oren	5 ppm	10 mg	90 menit	97% dan 99%	(Muthuvel et al., 2021)
5.	Rhodamine B	-	0,7 g	80 menit	90%	(Nabi et al., 2021)
6.	Asam pikrat (Picric Acid)	-	10 mg	120 menit	-	(Hariharan et al., 2018)
7.	Rhodamin B	20 ppm	0,4 mg	50 menit	50%	(Sonker et al., 2020)
8.	Treated municipal wastewater (TWW)	-	-	5 jam	80%	(Goutam et al., 2018)

Pada **Tabel 2** di atas dapat dilihat bahwa terdapat beberapa jenis polutan dalam proses aktivitas fotokatalis oleh nanopartikel TiO₂. Pada polutan timbal (Pb) penelitian oleh Sethy, dkk (2020) dengan konsentrasi larutan 8 ppm, massa katalis 0,3 g dan waktu penyinaran selama 17 jam menghasilkan persentase degradasi sebesar 82,53%. Pada polutan pewarna Rhodamin B penelitian oleh Nabi, dkk (2022) dengan waktu penyinaran selama 120 menit menghasilkan persentase degradasi sebesar 70%. Pada polutan metilen biru dan metilen oren pada penelitian Muthuvel, dkk (2021) dengan konsentrasi 5 ppm, massa katalis 10 mg dan waktu penyinaran selama 90 menit menghasilkan nilai persentase degradasi masing-masing 97% dan 99%. Pada polutan rhodamin B penelitian oleh Nabi, dkk (2021) dengan massa katalis 0,7 g dan waktu penyinaran selama 80 menit menghasilkan persentase degradasi sebesar 90%. Pada polutan rhodamine B penelitian oleh Sonker, dkk(2020) dengan konsentrasi 20 ppm, massa katalis 0,4 mg dan waktu penyinaran selama 50 menit menghasilkan persentase degradasi sebesar 50%. Pada polutan TWW penelitian oleh Goutam, dkk (2018) dengan lama penyinaran selama 5 jam menghasilkan persentase degradasi sebesar 80%. Berdasarkan beberapa penelitian yang telah dilakukan selain nilai band gap dan ukuran partikel pada nanopartikel TiO₂ konsentrasi, massa katalis dan waktu penyinaran juga mempengaruhi nilai persentase degradasi pada proses aktivitas fotokatalis.

III. KESIMPULAN

Berdasarkan beberapa artikel yang dikemukakan penelitian tentang nanopartikel TiO₂ telah berhasil disintesis menggunakan metode *green synthesis* dengan ekstrak tanaman sebagai bahan pereduksi. Adapun beberapa ekstrak tanaman tersebut yaitu, daun juwet, kulit lemon, daun Malaka, akar tarum, jeruk nipis, gel aloe vera, daun lidah buaya dan daun pagar jarak. Dengan berbagai jenis pereduksi yang digunakan untuk sintesis TiO₂ pereduksi yang baik menggunakan ekstrak *gel aloe vera* dan ekstrak daun juwet karena memiliki karakteristik ukuran partikel dan ukuran kristalit yang kecil serta memiliki energi *band gap* yang sudah sesuai dengan struktur nanopartikel TiO₂ dengan fasa anatase. Selain itu, nanopartikel yang berhasil disintesis juga dapat dimanfaatkan aktivitas fotokatalis dengan berbagai jenis polutan diantaranya, timbal (Pb), rhodamine B, coralline red, metilen biru, metilen oren, asam pikrat dan *treated municipal wastewater* (TWW). Dengan

berbagai variasi waktu penyinaran persentase degradasi dalam proses aktivitas fotokatalis mencapai hingga 99%. Sehingga sintesis nanopartikel TiO₂ dengan ekstrak tanaman sebagai pereduksi ini layak untuk dikembangkan dalam aktivitas fotokatalis dengan berbagai jenis polutan yang dapat membuat pencemaran air dan berbahaya untuk lingkungan air.

DAFTAR PUSTAKA

- Agustiana, A. A. (2022). Aktivitas Fotokatalis Nano TiO₂ Terimobilisasi Membran Poliuretan Dalam Reaksi Fotodegradasi Zat Warna Metilen Biru. Skripsi. Fakultas Sains dan Teknologi. Universitas Islam Negeri Ar-Raniry: Banda Aceh.
- Dastan, D., & Chaure, N. B. (2014). Influence of Surfactants on TiO₂ Nanoparticles Grown by Sol-Gel Technique. *International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing*, January, 21–24. <https://doi.org/10.7763/ijmmm.2014.v2.91>
- Gabryelle, K., Fadil, M., & Ramadhan, A. (2023). *Limbah Red Base 218 (Synthesis Nanocomposites of Nanocellulose-TiO₂ for Red Base 218 Waste Water Treatment)*. 218, 51–57.
- Goutam, S. P., Saxena, G., Singh, V., Yadav, A. K., Bharagava, R. N., & Thapa, K. B. (2018). Green synthesis of TiO₂ nanoparticles using leaf extract of *Jatropha curcas* L. for photocatalytic degradation of tannery wastewater. *Chemical Engineering Journal*, 336, 386–396. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.12.029>
- Hariharan, D., Jegatha Christy, A., Mayandi, J., & Nehru, L. C. (2018). Visible light active photocatalyst: Hydrothermal green synthesized TiO₂ NPs for degradation of picric acid. *Materials Letters*, 222, 45–49. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2018.03.109>
- Muthuvel, A., Said, N. M., Jothibas, M., Gurushankar, K., & Mohana, V. (2021). Microwave-assisted green synthesis of nanoscaled titanium oxide: photocatalyst, antibacterial and antioxidant properties. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 32(18), 23522–23539. <https://doi.org/10.1007/s10854-021-06840-3>
- Nabi, G., Ain, Q. U., Tahir, M. B., Nadeem Riaz, K., Iqbal, T., Rafique, M., Hussain, S., Raza, W., Aslam, I., & Rizwan, M. (2022). Green synthesis of TiO₂ nanoparticles using lemon peel extract: their optical and photocatalytic properties. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 102(2), 434–442. <https://doi.org/10.1080/03067319.2020.1722816>
- Nabi, G., Majid, A., Riaz, A., Alharbi, T., Arshad Kamran, M., & Al-Habardi, M. (2021). Green synthesis of spherical TiO₂ nanoparticles using Citrus Limetta extract: Excellent photocatalytic water decontamination agent for RhB dye. *Inorganic Chemistry Communications*, 129(February), 108618. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2021.108618>
- Rahman, T., Fadhlulloh, M. A., Nandiyanto, A. B. D., & Mudzakir, A. (2014). Review : Sintesis Titanium Diokasida Nanopartikel. *Jurnal Integrasi Proses*, 5(1), 15–29.
- Rasheed, R. T. (2017). *Synthesis and Antibacterial Activity of Rutile-TiO₂ Nano Powder Prepared by Hydrothermal Process*. 0202(5), 1744–1754.
- Safaat, M. (2020). Potensi Logam Oksida Sebagai Fotokatalis Degradasi Plastik Di Air Laut. *Oseana*, 45(1), 40–58. <https://doi.org/10.14203/oseana.2020.vol.45no.1.54>
- Saranya, S. K. S. K. S., Padil, V. V. T., Senan, C., Pilankatta, R., Saranya, S. K. K., George, B., Wacławek, S., & Černík, M. (2018). Green synthesis of high temperature stable anatase titanium dioxide nanoparticles using gum kondagogu: Characterization and solar driven photocatalytic degradation of organic dye. *Nanomaterials*, 8(12). <https://doi.org/10.3390/nano8121002>
- Sethy, N. K., Arif, Z., Mishra, P. K., & Kumar, P. (2020). Green synthesis of TiO₂ nanoparticles from *Syzygium cumini* extract for photo-catalytic removal of lead (Pb) in explosive industrial wastewater. *Green Processing and Synthesis*, 9(1), 171–181. <https://doi.org/10.1515/gps-2020-0018>
- Sharma, M., Behl, K., Nigam, S., & Joshi, M. (2018). TiO₂-GO nanocomposite for photocatalysis and environmental applications: A green synthesis approach. *Vacuum*, 156(December 2017), 434–439. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2018.08.009>
- Singh, A., Goyal, V., Singh, J., & Rawat, M. (2020). Structural, morphological, optical and photocatalytic properties of green synthesized TiO₂ NPs. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, 3, 100033. <https://doi.org/10.1016/j.crgsc.2020.100033>
- Sonker, R. K., Hitkari, G., Sabhajeet, S. R., Sikarwar, S., Rahul, & Singh, S. (2020). Green synthesis of TiO₂ nanosheet by chemical method for the removal of Rhodamin B from industrial waste. *Materials Science and Engineering B: Solid-State Materials for Advanced Technology*, 258(May), 114577. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2020.114577>
- Sucahya, T. N., Permatasari, N., & Nandiyanto, A. B. D. (2016). REVIEW: Fotokatalisis untuk Pengolahan Limbah Cair. *Jurnal Integrasi Proses*, 6(1), 1–15. <http://dx.doi.org/10.36055/jip.v6i2.430>
- Sutrisno, D. P. dan H. (2020). *Pengembangan Titanium Dioksida (TiO₂) untuk Aplikasi sebagai Material Antiburam*. July. <https://suyanto.id/pengembangan-titanium-dioksida-tio2-untuk-aplikasi-sebagai-material-antiburam/>
- Verma, V., Al-Dossari, M., Singh, J., Rawat, M., Kordy, M. G. M., & Shaban, M. (2022). A Review on Green Synthesis of TiO₂ NPs: Synthesis and Applications in Photocatalysis and Antimicrobial. *Polymers*, 14(7).

<https://doi.org/10.3390/polym14071444>

- Wang, J., Li, S., Yan, W., Tse, S. D., & Yao, Q. (2011). Synthesis of TiO₂ nanoparticles by premixed stagnation swirl flames. *Proceedings of the Combustion Institute*, 33(2), 1925–1932. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2010.05.022>
- Widiana, I., & Astuti, K. W. (2021). Prototype Pengolahan Air Sistem Semi Kontinu Secara Fotokatalisis Menggunakan Nanopartikel TiO₂. *Warta Akab*, 45(2), 56–59. <https://doi.org/10.55075/wa.v45i2.50>
- Wulandari, M., Astuti, A., & Muldarisnur, M. (2018). Sintesis Nanopartikel TiO₂-SiO₂ Berpori Sebagai Fotokatalis untuk Penjernihan Air Limbah Rumah Tangga. *Jurnal Fisika Unand*, 7(1), 33–38. <https://doi.org/10.25077/jfu.7.1.33-38.2018>
- Yuliana, P. (2020). Adsorpsi Zat Warna Metilen Biru Pada Arang Cangkang Kemiri Teraktivasi H₃PO₄. Skripsi. Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam. Universitas Tribuana Kalabahi.