

Green Synthesis TiO_2 Menggunakan Ekstrak Daun Pepaya (*Carica Papaya L.*) sebagai Bioreduktor yang Berpotensi dalam Aplikasi Fotokatalitik

*Green Synthesis of TiO_2 Using Papaya (*Carica papaya L.*) Leaf Extract as a Bioreductor with Potential in Photocatalytic Applications*

Agus Mifthakhul Riska, Nugrahani Primary Putri*

Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Negeri Surabaya
Jln. Ketintang, Surabaya 60231

ABSTRAK

TiO_2 terkenal di antara oksida logam sebagai bahan multifungsi yang memainkan peran penting dalam berbagai aplikasi karena stabilitas fisik dan non toksisitasnya yang baik. Di sisi lain sintesis TiO_2 secara konvensional menggunakan bahan-bahan kimia yang berbahaya dan beracun, seperti asam sulfat dan hidrogen peroksida menyebabkan proses sintesis TiO_2 menjadi tidak ramah lingkungan serta berpotensi menimbulkan dampak negatif bagi kesehatan manusia dan lingkungan. Penelitian ini melaporkan hasil sintesis TiO_2 NPs yang mudah, tidak beracun, hemat biaya dan ramah lingkungan menggunakan ekstrak daun pepaya (*Carica Papaya L.*) sebagai agen pereduksi yang memiliki potensi aplikasi untuk fotokatalitik. Analisis XRD mengungkapkan struktur kristal tetragonal untuk TiO_2 NPs memperlihatkan sifat dan ukuran kristalnya sebesar 9.65 nm. Hasil SEM memberikan informasi terkait morfologi bulat dan terdapat aglomerasi, kemudian analisis EDX menunjukkan puncak unsur titanium (Ti), oksigen (O), karbon (C) dan kalium (K) serta persentase atom dan berat yang sesuai. Dengan energy band gap sebesar 2.46 eV, menjadikan TiO_2 NPs hasil *greensynthesis* memiliki potensi fotokatalitik yang luar biasa, hal tersebut dikofirmasi dengan hasil grafik absorbansi TiO_2 NPs dalam mendegradasi pewarna *congo red* 30 ppm selama 180 menit, dan menghasilkan persentase degradasi sebesar 95.52 %.

Kata Kunci: TiO_2 , daun pepaya, fotokatalitik

ABSTRACT

TiO_2 is well known among metal oxides as a multifunctional material that plays an important role in various applications due to its good physical stability and non-toxicity. On the other hand, the conventional synthesis of TiO_2 using hazardous and toxic chemicals, such as sulfuric acid and hydrogen peroxide causes the TiO_2 synthesis process to be environmentally unfriendly and has the potential to cause negative impacts on human health and the environment. This study reports the results of an easy, non-toxic, cost-effective and environmentally friendly synthesis of TiO_2 NPs using papaya leaf extract (*Carica Papaya L.*) as a reducing agent that has potential applications for photocatalysts. XRD analysis revealed a tetragonal crystal structure for TiO_2 NPs showing its nature and crystal size of 9.65 nm. SEM image provides information regarding the spherical morphology and agglomeration, then EDX analysis shows the peaks of titanium (Ti), oxygen (O), carbon (C) and potassium (K) elements as well as the corresponding atomic percentage and weight. With an energy band gap of 2.46 eV, making TiO_2 NPs *greensynthesis* results have exceptional photocatalyst potential. This is confirmed by the results of the absorbance graph of TiO_2 NPs in degrading 30 ppm *congo red* dye for 180 minutes, and produces a degradation percentage of 95.52%.

Key Words: TiO_2 , leaf papaya extract, photocatalytic

PENDAHULUAN

Kemajuan nanoteknologi telah menarik minat para ilmuwan diberbagai disiplin ilmu karena dapat digunakan untuk deteksi, diagnosis dan pemurnian kontaminan lingkungan (Sharma *et al.*, 2018). Riset tentang struktur nano membutuhkan pemahaman yang lebih terkait bentuk kristal dan struktur yang dapat diperoleh melalui desain baru dan metode sintesis yang sederhana (Moritz *et al.*, 1997). Sintesis nanopartikel yang ramah lingkungan telah mengalami kemajuan pesat dalam nanosains dan penerapannya diberbagai bidang seperti katalis, antimikroba (Ahmad *et al.*, 2020), antikanker (Al-

Shabib *et al.*, 2020), penghantaran obat dengan target spesifik (Bekele *et al.*, 2020), dan pertanian (Rodríguez-González *et al.*, 2019). Saat ini metode sintesis yang ramah lingkungan telah menjadi rekomendasi dalam rangka mengembangkan teknik sintesis berkelanjutan yang potensial untuk mengurangi penggunaan bahan berbahaya pada material nano. Dalam beberapa tahun terakhir telah terjadi lonjakan minat yang luar biasa dalam pembuatan material nano menggunakan teknologi hijau (*green synthesis*) yang berkelanjutan, struktur anorganik yang menunjukkan fitur-fitur baru dan ukurannya yang berskala nano (NPs) menjadi daya

*Alamat korespondensi:
nugrahaniprimary@unesa.ac.id

tarik tersendiri bagi para peneliti (Marimuthu *et al.*, 2013). Ekstrak tanaman (daun, batang, bunga dan akar) mengandung komponen yang menyebabkan ion-ion logam menjadi berkurang (Nithya *et al.*, 2013). Ekstrak tersebut juga memiliki agen *capping* yang alami dan efektif dalam bentuk protein untuk menjaga NPs tetap stabil (Saini & Kumar, 2023).

TiO₂ terkenal di antara oksida logam sebagai bahan multifungsi yang memainkan peran penting dalam berbagai aplikasi karena stabilitas fisik dan non toksisitasnya yang baik (Hudlikar *et al.*, 2012). *Anatase*, *rutile*, dan *brookite* adalah tiga polimorf utama struktur nano TiO₂. Memiliki luas permukaan besar, energi potensial tinggi untuk membawa muatan yang dihasilkan oleh fotogenerasi, dan aktivitas fotokatalitik yang unggul, fase anatase adalah bentuk yang paling diminati. Namun, sintesis TiO₂ secara konvensional menggunakan bahan-bahan kimia yang berbahaya dan beracun, seperti asam sulfat dan hidrogen peroksida menyebabkan proses sintesis TiO₂ menjadi tidak ramah lingkungan dan berpotensi menimbulkan dampak negatif terhadap kesehatan manusia dan lingkungan (Jalil *et al.*, 2016). Ahmad *et al.*, (2020) melaporkan bahwa TiO₂ NPs berhasil disintesis melalui ekstrak daun *Mentha arvensis*, kemudian Ansari *et al.*, (2022) berhasil mensintesis TiO₂ NPs menggunakan ekstrak daun *Acorus calamus* yang diaplikasikan untuk mendegradasi pewarna RhB, serta Saini & Kumar pada tahun 2023 membuktikan bahwa ekstrak tanaman *Tinospora cordifolia* juga dapat digunakan sebagai agen pereduksi dalam sintesis TiO₂.

Berdasarkan informasi penelitian di atas penggunaan ekstrak pepaya sebagai agen pereduksi dalam pembuatan TiO₂ sangatlah terbatas, sehingga dalam penelitian ini membahas terkait proses *green synthesis* TiO₂ NPs menggunakan ekstrak daun pepaya (*Carica papaya L.*) beserta karakteristiknya yang memiliki potensi luar biasa untuk aplikasi fotokatalitik dalam mendegradasi pewarna sintetis berbahaya yang bersifat *non-biodegradable*.

METODE PENELITIAN

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah, Daun pepaya sebagai bahan pereduksi, TTIP *Titanium Tetra Isopropoxide* (TTIP, Sigma Aldrich, 97%) sebagai prekursor, serta NH₃ 1M (SAP Chemicals) dan aquades, alat yang digunakan terdiri dari Hot Plate Stirrer Thermo Scientific Cimarec Sp8885710, Horizontal Drying Oven Faithful 101-0A, serta Muffle furnace Nabertherm L3/11/B170 dan alu-mortar.

Selanjutnya untuk mengetahui struktur, kristalinitas, morfologi dan potensi aplikasi

fotokatalitik TiO NPs kemudian dianalisa menggunakan instrumentasi karakterisasi X-Ray Diffraction (XRD) Rigaku Miniflex 600 dengan sudut pengujian 10°-90° yang. Kemudian untuk menentukan ukuran kristalinitasnya, dapat ditentukan dari nilai FWHM berdasarkan sudut 2theta yang menunjukkan puncak difraksi (peak) dan dilakukan perhitungan dengan menggunakan persamaan Scherrer

$$D = \lambda K / \beta \cos \theta \quad (2.1)$$

dimana D: merupakan ukuran kristalit, K: konstanta Scherrer (K= 0.89), λ: panjang gelombang radiasi sinar-x (λ=0.15418 nm), β: *Full Width at Half Maximum* (FWHM) puncak difraksi ke bidang kristalografi anatase yang sesuai dan θ: sudut puncak difraksi sinar-x. Scanning Electrone Microscope Energy Dispersive X-Ray (SEM-EDX) Thermo Fisher phenom ProX dengan perbesaran 30.000x dengan rata-rata butir TiO₂ yang dihitung menggunakan software ImageJ, dan

UV Vis Shimadzu 1800 dengan panjang gelombang yang digunakan 200 nm-800 nm Hasil UV Vis yang telah diperoleh dimanfaatkan untuk menentukan energi *band gap* melalui persamaan Tauc-plot berikut (Sharma *et al.*, 2018):

$$(\alpha h\nu)^{1/2} = D(h\nu - E_g) \quad (2.2)$$

di mana, α adalah koefisien adsorpsi, hν adalah energi, E_g adalah energi *band gap*, dan D adalah konstanta, kemudian dari hasil absorbance yang didapatkan dilakukan perhitungan persentase degradasi menggunakan persamaan:

$$(\eta\%) = \frac{A_0 - A_t}{A_0} \times 100\% \quad (2.3)$$

A₀ merupakan absorbansi *congo red* saat 0 menit dan A_t merupakan absorbansi *congo red* setelah t menit (Krobthong *et al.*, 2023). Berikut tahapan *green synthesis* dalam penelitian ini (Gambar 1).

a. Pembuatan ekstrak Daun Pepaya (*Carica Papaya L.*)

Ekstrak daun pepaya dibuat menggunakan daun pepaya jenis California, Daun pepaya dicuci dengan air mengalir untuk menghilangkan kotoran di permukaan, kemudian daun yang telah bersih dirajang. Daun dikeringkan pada suhu 55° C dalam oven selama 180 menit.

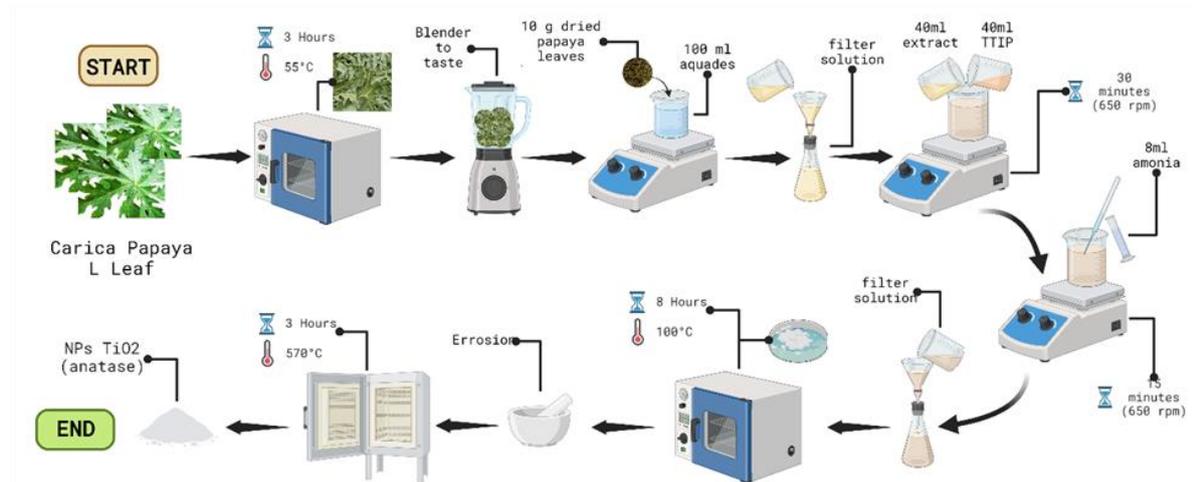
Daun kering diblender dan serbuk yang diperoleh disimpan. 10 g serbuk daun pepaya dicampurkan dengan 100 ml aquades kemudian diaduk selama 60 menit pada suhu 50° C - 60° C menggunakan *magnetic stirrer*. Ekstrak yang diperoleh setelah pengadukan dan pemanasan disaring menggunakan kertas saring untuk sintesis nanopartikel.

b. Green Synthesis TiO₂ NPs

TiO₂ NPs didapatkan dengan menambahkan 40 ml 0,5 M TTIP dalam 40 ml ekstrak daun pepaya

dengan perbandingan 1:1 (v/v) dalam pengadukan kontinu 650 rpm menggunakan *magnetic stirrer*. Setelah 30 menit, 8 ml amonia ditambahkan setetes demi setetes ke dalam campuran dan endapan diperoleh. Endapan dipisahkan dari campuran melalui penyaringan dan dicuci dengan etanol untuk menghilangkan ion dan pengotor lainnya.

Endapan yang telah dicuci dikeringkan dalam oven dengan suhu 100° C dan dihaluskan menggunakan alu-mortar. Terakhir serbuk halus TiO₂ dikalsinasi pada suhu 570° C dalam muffle furnace selama 3 jam.



Gambar 1. Proses *green synthesis* TiO₂ NPs

HASIL DAN PEMBAHASAN

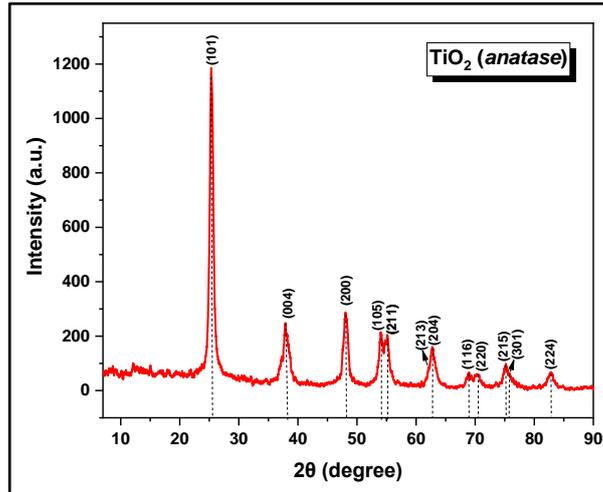
Analisis XRD dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui struktur pola difraksi yang terbentuk pada sampel. Gambar 2 menunjukkan pola XRD dari serbuk TiO₂ yang disintesis. Puncak difraksi dari pola yang diamati pada sudut 2 θ yaitu, 25,30°, 37,91°, 48,05°, 54,10°, 55,12°, 62,08°, 62,64°, 68,98°, 70,22°, 75,09°, 75,90° dan 82,56° disebabkan oleh pemantulan Bragg dari bidang kisi yang berbeda, dengan indeks miller (101), (004), (200), (105), (211), (213), (204), (116), (220), (215), (301) dan (224). Puncak-puncak tersebut sangat cocok dengan kartu standar sampel serbuk TiO₂ anatase dengan nomor kartu Joint Committee on Powder Diffraction Standards (JCPDS) : 01-078-2486.

Tidak ada tambahan puncak tambahan yang terkait dengan pengotor diamati dalam pola, memvalidasi fase anatase murni TiO₂. Puncak difraksi mengungkapkan kristalinitas dan komposisi kristalit masing-masing berukuran nano partikel (Rajakumar et al., 2012). Luasnya puncak difraksi disebabkan oleh difraksi dari beberapa jumlah atom (kristalit) dalam NP yang tidak dapat menyatu ke dalam garis difraksi tetapi melebar.

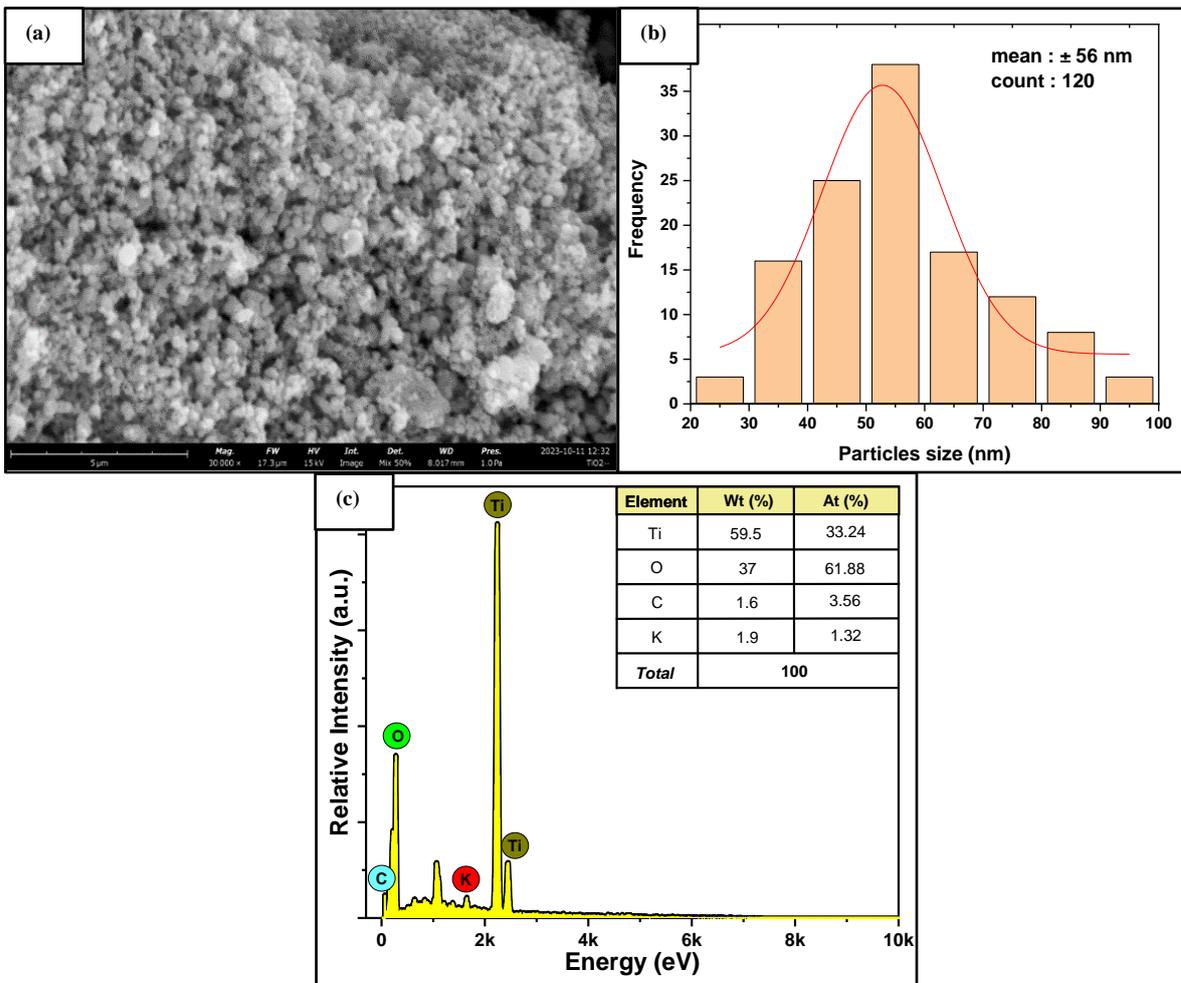
Rata-rata ukuran kristalit TiO₂ NPs telah dihitung dari pola XRD menggunakan persamaan Debye-Scherrer yakni pada persamaan 2.1 didapatkan ukuran kristalit sebesar 9,65 nm.

Morfologi dari nanopartikel TiO₂ yang dihasilkan melalui metode *green synthesis* dianalisis diamati dan dianalisis seperti yang terlihat pada Gambar 3.(a) Hasil uji SEM menunjukkan bahwa morfologi TiO₂ dari daun pepaya berbentuk *spherical* dan menghasilkan distribusi yang cukup merata, meskipun dimensi nanopartikel menyebabkan terbentuknya beberapa aglomerasi. Secara umum nanopartikel TiO₂ pada perbesaran 30.000x memiliki distribusi ukuran dan bentuk yang seragam. Seperti yang ditunjukkan pada diagram histogram pada Gambar 3.(b) Hasil perhitungan tersebut menunjukkan bahwa ukuran rata-ratanya sebesar 56 nm, yang berarti ini membuktikan bahwa TiO₂ dari daun pepaya ini dapat dikatakan sebagai partikel yang berukuran nano. Dengan ukuran partikel tersebut maka luas permukaan menjadi besar sehingga saat pengaplikasian fotkatalitik menjadi lebih efektif,

karena material tersebut mampu menerima energi dari cahaya UV lebih banyak.



Gambar 2 Hasil XRD green synthesis TiO₂



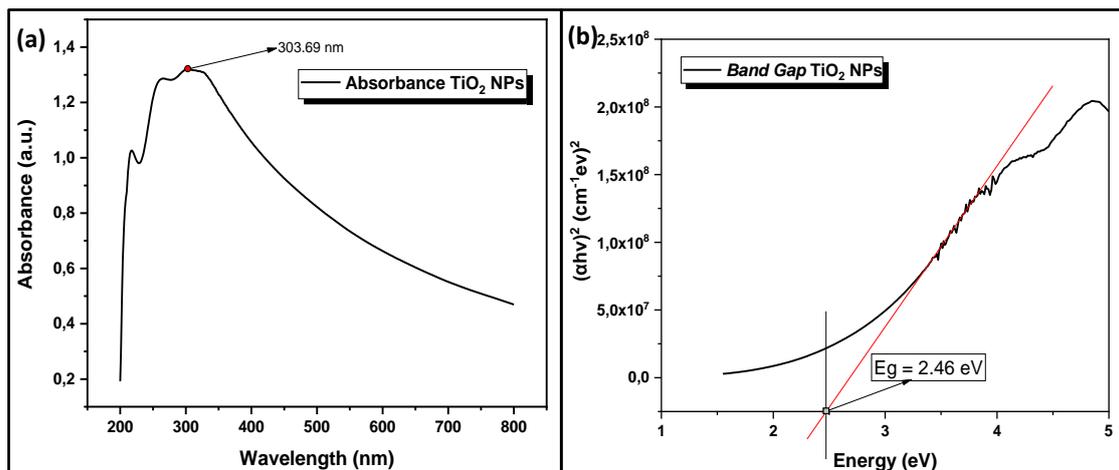
Gambar 3 Hasil karakterisasi SEM TiO₂ (a) Morfologi TiO₂ dengan perbesaran 25.000x (b) Histogram ukuran butir TiO₂ (c) Energy Dispersive X-Ray (EDX) nanopartikel TiO₂

Pada Gambar 3.(c) menunjukkan puncak unsur titanium (Ti), oksigen (O), karbon (C) dan kalium (K) serta persentase atom dan berat yang sesuai. Puncak C dan K yang teramati disebabkan oleh adanya vitamin C (asam askorbat) dan mineral (Ca, Mg, Na, K, Fe, dan Mn) dalam ekstrak daun pepaya (Haris et al., 2022). Analisis ini menegaskan bahwa unsur C pepaya secara aktif berpartisipasi dalam sintesis partikel TiO₂. EDX juga menegaskan kemurnian tinggi dari sampel yang disintesis karena menunjukkan tidak adanya unsur pengotor lainnya.

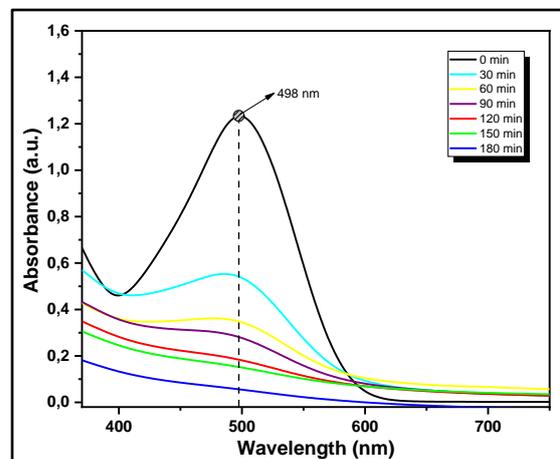
Karakterisasi UV-Vis digunakan untuk mengetahui energy gap dari nanopartikel TiO₂. Hasil yang didapatkan dari karakterisasi UV-Vis berupa spektrum panjang gelombang dengan nilai absorbansi. Spektrum UV-Vis ditunjukkan pada Gambar 4.(a) memperlihatkan bahwa puncak absorbansi terletak pada panjang gelombang 301 nm. Dari nilai panjang gelombang dan absorbansi yang telah didapatkan akan dicari energi *band gap*. *Band gap* merupakan perbedaan antara ujung bawah pita valensi (+) dengan ujung atas pita

konduksi (-) atau energi minimum yang diperlukan untuk mengeksitasi elektron dari pita valensi ke pita konduksi (Sankar et al., 2015). Metode *Tauc-plot* adalah sebuah metode untuk menentukan nilai *band gap* dengan melihat grafik linear hubungan E (eV) pada sumbu-x dan $(\alpha h\nu)$ pada sumbu-y (Missa et al., 2018). Energi *band gap* merupakan faktor penting yang mempengaruhi efektivitas pembentukan bahan katalis. Berdasarkan persamaan 2.2, grafik pada Gambar 4.(b) menunjukkan bahwa energi *band gap* yang dimiliki oleh TiO₂-NPs sebesar 2.46 eV.

Hasil ini menunjukkan TiO₂ NPs dapat berperan sebagai material fotokatalis yang efektif karena memiliki energi *band gap* yang kecil dimana semakin kecil energi *band gap* maka energi yang dibutuhkan untuk mengeksitasi elektron juga semakin sedikit dan mampu bereaksi secara intensif ketika terpapar sinar UV. Hal ini disebabkan oleh pembentukan radikal OH yang dapat menghilangkan zat pewarna dalam proses fotokatalitik (Tussa'adah, 2015).



Gambar 4. Hasil karakterisasi UV Vis TiO₂ (a) Spektrum UV-Vis (b) plot energi dengan $(\alpha h\nu)^{1/2}$



Gambar 5 Absorbansi TiO₂ NPs dalam mendegradasi pewarna *congo red* 30 ppm

Setelah mengetahui potensi TiO₂ NPs yang luar biasa dalam proses fotokatalitik, selanjutnya dilakukan pengaplikasian material TiO₂ NPs untuk mendegradasi pewarna *congo red* dengan konsentrasi larutan 30 ppm selama 180 menit di bawah sinar UV. Grafik absorbansi TiO₂ dalam mendegradasi pewarna *congo red* ditunjukkan oleh Gambar 5 terlihat proses degradasi terjadi secara bertahap, dimana pada puncak panjang gelombang 498 nm yang menjadi ciri khas pewarna *congo red* nilai absorbansi menurun seiring dengan pertambahan waktu, untuk mengetahui nilai persentase degradasi pewarna tersebut digunakan persamaan 2.3. Setelah melalui perhitungan, didapatkan persentase degradasi larutan *congo red* oleh proses fotokatalitik sebesar 95,52%.

SIMPULAN

Dalam penelitian ini berhasil mensintesis TiO₂ NPs dengan ekstrak daun pepaya sebagai bioreduktor melalui metode *green synthesis* dengan fasa yang terbentuk yakni anatase dan ukuran rata-rata kristalit sebesar 9,65 nm, selain itu TiO₂ NPs memiliki bentuk *spherical* dengan rata-rata ukuran partikel sebesar 56 nm dan memiliki energi *band gap* sebesar 2,46 eV yang menjadikan material TiO₂ NPs ini memiliki potensi besar dalam fotokatalitik dan ketika diuji cobakan TiO₂ NPs ini mampu mendegradasi pewarna *congo red* dengan sebesar 95,52 % dalam kurun waktu 180 menit. Sehingga dapat disimpulkan bahwasannya daun pepaya dapat digunakan sebagai agen pereduksi dalam sintesis nanopartikel TiO₂ dan hasil dari sintesis tersebut menunjukkan potensi yang luar biasa dalam pengaplikasian fotokatalitik.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Laboratorium Material Jurusan Fisika Universitas Negeri Surabaya, Laboratorium Terpadu Biologi, Universitas Negeri Surabaya, Laboratorium Nanoteknologi, Universitas Airlangga, Lembaga Ilmu Hayati dan Rekayasa, Universitas Airlangga yang telah memberi fasilitas dan kemudahan dalam proses karakterisasi pada penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

Ahmad W, Jaiswal KK, & Soni S, 2020. Green synthesis of titanium dioxide (TiO₂) nanoparticles by using *Mentha arvensis* leaves extract and its antimicrobial properties. *Inorganic and Nano-Metal Chemistry*, 50(10): 1032-1038.
<https://doi.org/10.1080/24701556.2020.1732419>

Sains dan Matematika, Vol 9, No. 1, April 2024: 1-7
 Al-Shabib NA, Husain FM, Qais FA, Ahmad N, Khan A, Alyousef AA, Arshad M, Noor S, Khan JM, Alam P, Albalawi TH, & Shahzad SAI, 2020. Phyto-Mediated Synthesis of Porous Titanium Dioxide Nanoparticles From *Withania somnifera* Root Extract: Broad-Spectrum Attenuation of Biofilm and Cytotoxic Properties Against HepG2 Cell Lines. *Frontiers in Microbiology*, 11(July), 1-13.
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.01680>
 Ansari A, Siddiqui VU, Rehman WU, Akram MK, Siddiqui WA, Alosaimi AM, Hussein MA, & Rafatullah M, 2022. Correction: Green Synthesis of TiO₂ Nanoparticles Using *Acorus calamus* Leaf Extract and Evaluating Its Photocatalytic and In Vitro Antimicrobial Activity (*Catalysts*, (2022), 12, (181), 10.3390/catal12020181). *Catalysts*, 12(11).
<https://doi.org/10.3390/catal12111451>
 Bekele ET, Gonfa BA, Zelekew OA, Belay HH, & Sabir FK, 2020. Synthesis of Titanium Oxide Nanoparticles Using Root Extract of *Kniphofia foliosa* as a Template, Characterization, and Its Application on Drug Resistance Bacteria. *Journal of Nanomaterials*, 2020, 1-10.
<https://doi.org/10.1155/2020/2817037>
 Haris MI, Mayulu H, & Suyadi S, 2022. Nutrient, phytochemical, and digestibility evaluation of papaya leaves (*Carica papaya* L.) as an alternative feedstuff for ruminants. *Jurnal Ilmu-Ilmu Peternakan*, 32(1):87-98.
<https://doi.org/10.21776/ub.jiip.2022.032.0109>
 Hudlikar M, Joglekar S, Dhaygude M, & Kodam K, 2012. Green synthesis of TiO₂ nanoparticles by using aqueous extract of *Jatropha curcas* L. latex. *Materials Letters*, 75: 196-199.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matlet.2012.02.018>
 Jalill RDA, Nuaman RS, Abd AN. 2016. Biological synthesis of Titanium Dioxide nanoparticles by *Curcuma longa* plant extract and study its biological properties. *WSN*, 49, 204-222.
 Krobthong S, Rungsawang T, & Wongrerkdee S. 2023. Comparison of ZnO Nanoparticles Prepared by Precipitation and Combustion for UV and Sunlight-Driven Photocatalytic Degradation of Methylene Blue. *Toxics*, 11(3).
<https://doi.org/10.3390/toxics11030266>
 Marimuthu S, Rahuman AA, Jayaseelan C, Kirthi A. V, Santhoshkumar T, Velayutham K, Bagavan

- A, Kamaraj C, Elango G, Iyappan M, Siva C, Karthik L, & Rao KVB, 2013. Acaricidal activity of synthesized titanium dioxide nanoparticles using *Calotropis gigantea* against *Rhipicephalus microplus* and *Haemaphysalis bispinosa*. *Asian Pacific Journal of Tropical Medicine*, 6(9): 682–688. [https://doi.org/10.1016/S1995-7645\(13\)60118-2](https://doi.org/10.1016/S1995-7645(13)60118-2)
- Missa MMY, Pingak RK, & Sutaji HI, 2018. Penentuan Celah Energi Optik Ekstrak Daun Alpukat (*Persea Americana* Mill) Asal Desa Oinlasi Menggunakan Metode Tauc Plot. *Jurnal Fisika : Fisika Sains Dan Aplikasinya*, 3(1): 86–90. <https://doi.org/10.35508/fisa.v3i1.606>
- Moritz T, Reiss J, Diesner K, Su D, & Chemseddine, A, 1997. Nanostructured Crystalline TiO₂ through Growth Control and Stabilization of Intermediate Structural Building Units. *The Journal of Physical Chemistry B*, 101(41): 8052–8053. <https://doi.org/10.1021/jp9705131>
- Nithya A, Rokesh K, Jothivenkatachalam K, 2013. Biosynthesis, Characterization and Application of Titanium Dioxide Nanoparticles. *Nano Vis.*, 3: 169–174.
- Rajakumar G, Rahuman AA, Priyamvada B, Khanna VG, Kumar DK, & Sujin PJ, 2012. Eclipta prostrata leaf aqueous extract mediated synthesis of titanium dioxide nanoparticles. *Materials Letters*, 68: 115–117. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.m>
- atlet.2011.10.038
- Rodríguez-González V, Terashima C, & Fujishima A, 2019. Applications of photocatalytic titanium dioxide-based nanomaterials in sustainable agriculture. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, 40, 49–67. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochemrev.2019.06.001>
- Sain, R, & Kumar P, 2023. Green synthesis of TiO₂ nanoparticles using *Tinospora cordifolia* plant extract & its potential application for photocatalysis and antibacterial activity. *Inorganic Chemistry Communications*, 156(August), 111221. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2023.111221>
- Sankar R, Rizwana K, Shivashangari KS, & Ravikumar V, 2015. Ultra-rapid photocatalytic activity of *Azadirachta indica* engineered colloidal titanium dioxide nanoparticles. *Applied Nanoscience (Switzerland)*, 5(6): 731–736. <https://doi.org/10.1007/s13204-014-0369-3>
- Sharma M, Behl K, Nigam S, & Joshi M, 2018. TiO₂-GO nanocomposite for photocatalysis and environmental applications: A green synthesis approach. *Vacuum*, 156: 434–439. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2018.08.009>
- Tussa'adah R, 2015. Sintesis material fotokatalis TiO₂ TEKSTIL., untuk penjernihan limbah. *Jurnal Fisika Unand*, 4(1): 91–96.