

SINTESIS DAN KARAKTERISASI FOTOKATALIS NANO TiO_2 -MEMBRAN POLIURETAN BERBASIS MINYAK ALPUKAT, HDI, DAN *POLYETHYLENE GLYCOL* (PEG) PADA FOTODEGRADASI METIL JINGGA

Abdul Hamid Arrazi^{1*}, Devi Indah Anwar¹, Lela Lailatul Khumaisah¹

¹Program Studi Kimia, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Muhammadiyah Sukabumi
Jl. R Syamsudin, S.H. No. 50, Sukabumi, 43113, Jawa Barat,

*Email: hamidarrazia@ummi.ac.id

Abstrak

Pewarna sintetis seperti metil jingga tergolong polutan resisten yang sulit diuraikan secara biologis, sehingga memerlukan teknologi pengolahan yang efektif dan berkelanjutan. Penelitian ini mengembangkan membran fotokatalitik berbasis poliuretan (PU) dari minyak biji alpukat, *heksametilen diisosiyanat* (HDI), dan *polyethylene glycol* (PEG) untuk mengimobilisasi TiO_2 nanopartikel. PEG digunakan sebagai aditif pendispersi guna mencegah aglomerasi TiO_2 dan meningkatkan hidrofilitas membran. Karakterisasi XRD memperlihatkan bahwa TiO_2 berada pada fasa anatase dengan puncak intensitas 2θ sebesar 25.2740° . Analisis FTIR mengindikasikan keberhasilan sintesis PU melalui identifikasi gugus fungsi khas $-\text{NH}$, $-\text{C}=\text{O}$ (karbonil uretan), dan $-\text{C}-\text{O}-\text{C}$ (eter) dari PEG, serta vibrasi $\text{Ti}-\text{O}$ dan $\text{Ti}-\text{O}-\text{Ti}$ sebagai penanda kehadiran TiO_2 . Sementara itu, hasil SEM memperlihatkan morfologi semi-globular dari partikel TiO_2 yang terdispersi merata dalam matriks PU tanpa aglomerasi besar. Uji kinerja fotodegradasi menggunakan radiasi UV-A (265 nm) pada jarak iradiasi 11 cm menunjukkan bahwa efisiensi degradasi tertinggi sebesar 91.165% pada pH 4, dengan stabilitas performa yang baik pada siklus pemakaian ulang sebesar 91.173%. Tingginya efektivitas ini dikaitkan dengan interaksi elektrostatis antara permukaan TiO_2 bermuatan positif dan molekul metil jingga yang bermuatan negatif, sehingga mempercepat pembentukan spesies radikal reaktif selama proses fotokatalitik.

Kata kunci: fotodegradasi, minyak biji alpukat, membran poliuretan, metil jingga, TiO_2

Abstract

Synthetic dyes such as methyl orange are classified as persistent pollutants that are difficult to degrade biologically, thus requiring effective and sustainable treatment technologies. This study develops a photocatalytic membrane based on polyurethane (PU) synthesized from avocado seed oil, hexamethylene diisocyanate (HDI), and polyethylene glycol (PEG) for immobilizing TiO_2 nanoparticles. PEG was used as a dispersing additive to prevent TiO_2 agglomeration and enhance the membrane's hydrophilicity. XRD characterization revealed that the TiO_2 nanoparticles were predominantly in the anatase phase, with a characteristic diffraction peak at $2\theta = 25.2740^\circ$. FTIR analysis confirmed the successful synthesis of PU through the identification of characteristic functional groups, including $-\text{NH}$, $-\text{C}=\text{O}$ (urethane carbonyl), and $-\text{C}-\text{O}-\text{C}$ (ether) from PEG, as well as $\text{Ti}-\text{O}$ and $\text{Ti}-\text{O}-\text{Ti}$ vibrations indicating the presence of TiO_2 . SEM observations showed a semi-globular morphology of TiO_2 particles that were homogeneously dispersed within the PU matrix without significant agglomeration. Photodegradation performance tests under UV-A irradiation (265 nm) at an irradiation distance of 11 cm demonstrated a maximum degradation efficiency of 91.165% at pH 4, with good reusability stability, achieving 91.173% efficiency after repeated cycles. The high effectiveness is attributed to electrostatic interactions between the positively charged TiO_2 surface and negatively charged methyl orange molecules, which accelerate the generation of reactive radical species during the photocatalytic process.

Keywords: photodegradation, avocado seed oil, polyurethane membrane, methyl orange, TiO_2

1. PENDAHULUAN

Pewarna sintetis banyak digunakan pada industri tekstil, salah satunya metil jingga, yang sulit terdegradasi karena struktur aromatik kompleksnya (Oyarce *et al.*, 2021). Berbagai metode konvensional

seperti adsorpsi, koagulasi-flokulasi, dan elektrokimia telah diterapkan, namun menghasilkan limbah sekunder seperti lumpur berbahaya (Ahmad *et al.*, 2020). Fotodegradasi heterogen menawarkan pendekatan yang lebih bersih dengan

menginisiasi pembentukan pasangan elektron–lubang dan spesies oksigen reaktif (Chong *et al.*, 2010). Meski demikian, fotokatalis umum seperti ZnO, WO₃, dan TiO₂ memiliki keterbatasan inheren, termasuk fotokorosi (ZnO), aktivitas rendah (WO₃), serta keterbatasan aktivitas dan pemakaian ulang pada bentuk nanopartikel bebas (TiO₂) (Hoffmann *et al.*, 1995; Sugiyarto K.H., 2010; Saggioro *et al.*, 2011; Pelaez *et al.*, 2012). Karena itu, imobilisasi TiO₂ dalam membran polimer telah banyak dikembangkan untuk meningkatkan stabilitas dan kemampuan pakai ulang (Sonu *et al.*, 2021).

Poliuretan (PU) merupakan kandidat membran yang menjanjikan karena sifat mekanik dan ketahanannya yang memiliki kekuatan mekanik tinggi, fleksibel, tahan kimia, dan stabil secara termal (Fitriani, Marlina and Khairan, 2016). PU dapat disintesis dari minyak alami yang mengandung gugus hidroksil, seperti minyak biji alpukat yang kaya asam oleat, palmitat, dan linoleat (Prasetyowati, R. Pratiwi and Fera., 2010). Heksametilen diisosianat (HDI) digunakan sebagai *crosslinker* untuk membentuk struktur uretan (Prawithasari *et al.*, 2015), sedangkan *polyethylene glycol* (PEG) ditambahkan sebagai agen pendispersi untuk meningkatkan hidrofilisitas sekaligus membantu mencegah aglomerasi nanopartikel TiO₂ dalam matriks (Zhang *et al.*, 2024). *Polyethylene Glycol* (PEG) juga meningkatkan porositas melalui dekomposisi termal dan mencegah aglomerasi TiO₂ agar tidak menggumpal, lewat efek hambatan sterik (Nawawi *et al.*, 2017; Zhang *et al.*, 2022).

Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa minyak alpukat dan HDI dapat menghasilkan membran PU yang stabil pada rasiooptimum 1.6:5 (w/v) (Fitriani, Marlina and Khairan, 2016). Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan memodifikasi TiO₂ agar terimobilisasi pada membran PU dari minyak biji alpukat, HDI, dan PEG, serta mengevaluasi pengaruh pH terhadap efisiensi degradasi metil jingga. Selanjutnya membran sekaligus uji kestabilannya dalam siklus pemakaian ulang.

2. METODOLOGI PENELITIAN

Bahan-bahan yang dibutuhkan antara lain: minyak biji alpukat merk TSB, heksanametilen-1-6-diisosianat (HDI) dari Wanhua Chemical Group, kristal nano titanium dioksida tipe SY-TA15 dari Hebei Suoyi New Material Tech, Asam oleat, *polyethylene glycol* (PEG) 6000, asam klorida (Merck), natrium hidroksida (Merck), akuades, aseton, dan larutan metil jingga (CAS 547-58-0). Adapun peralatan yang digunakan adalah: Peralatan gelas, mikropipet, cawan petri, *Ultrasonic Homogenizer*, *Magnetic Stirrer*, neraca analitik, oven, reaktor fotokatalisis 40x20x15 cm, Lampu UV-A Sangkyo T8 (10 W), *X-Ray Diffraction* (XRD), *Fourier Transform Infra Red* (FTIR) dan *Scanning Electron Microscopy* (SEM), dan *Spektrofotometer UV-Vis Hitachi U2900*.

2.1 Prosedur Penelitian

2.1.1 Karakterisasi Serbuk Nano TiO₂

Serbuk nano TiO₂ tipe SY-TA15 dikarakterisasi menggunakan SEM untuk morfologi partikel, dan XRD untuk analisis struktur kristal serta ukuran kristalit dengan persamaan *scherrer*.

2.1.2 Sintesis Membran PU-Nano TiO₂

Serbuk nano TiO₂ 0.03 gram diaduk dengan asam oleat 0.05 mL (sebagai agen dispersi) serta aseton sebanyak 0.67 mL, (yang mengandung PEG 6000 8%) (Nawawi *et al.*, 2017; Ma, Chen and Zheng, 2021; Zhang *et al.*, 2022), dengan magnetic stirrer dengan kecepatan 1000 rpm selama 15 menit (Prawithasari *et al.*, 2015). Setelah itu, pada gelas beaker lain, campuran minyak biji alpukat sebanyak 5 mL (OH 70%) serta heksanametilen-1-6-diisosianat (HDI) 2 mL (NCO 49.9%) secara perlahan (Fitriani, Marlina and Khairan, 2016). Setelah pengadukan 8 menit, campuran nano TiO₂-aseton-PEG 0.67 mL ditambahkan.

Campuran diaduk dengan pemanasan 40°C selama 7 menit menggunakan *magnetic stirrer*, kemudian dicetak menggunakan cawan petri ukuran diameter 100 mm. Selanjutnya dioven dengan suhu 40°C selama 48 jam dan 12 jam pada suhu ruang (Prawithasari *et al.*, 2015; Fitriani, Marlina and Khairan, 2016).

2.1.3 Karakterisasi Membran PU-Nano TiO₂

Membran hasil sintesis dikarakterisasi menggunakan FTIR untuk identifikasi gugus fungsi, serta SEM untuk morfologi permukaan.

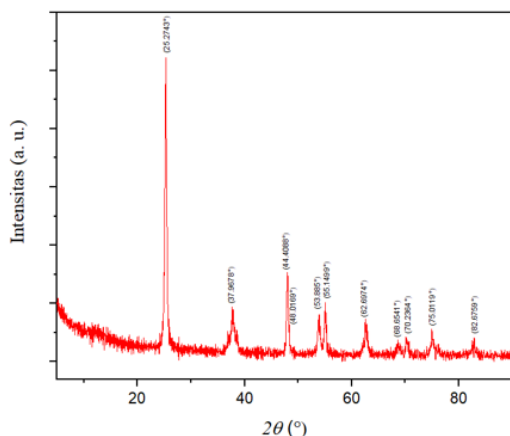
2.1.4 Fotodegradasi oleh Membran PU-Nano TiO₂

Larutan metil jingga 20 ppm sebanyak 100 mL diisi ke empat gelas kimia masing-masing diisi 25 mL larutan metil jingga 20 ppm. pH larutan diatur menggunakan HCl 0.1 M (pH 2. 4 dan NaOH 0.1 M (pH 8). Semua sampel dimasukan ke dalam Reaktor fotokatalisis yang digunakan memiliki dimensi 40 × 20 × 15 cm. Selanjutnya disinari 2 lampu UV-A (Sankyo T8, 10 W) dari jarak 11 cm waktu Absorbansi diukur setelah 240 menit. Proses diulang untuk evaluasi ulang performa fotokatalis (Ma, Chen and Zheng, 2021).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Karakterisasi Nano TiO₂ dengan X-Ray Diffraction

Nano TiO₂ SY-TA15 dikarakterisasi bertujuan untuk mengetahui fasa dan ukuran dari suatu partikel. Hasil XRD yang diperoleh disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Hasil karakterisasi XRD Nano TiO₂ SY-TA15

Dari Gambar 1, karakterisasi yang dilakukan pada TiO₂ tipe SY-TA15 menunjukkan hasil difraktogram untuk TiO₂ pada 2θ sebesar 25.274° untuk puncak utama yang terdiri dari fasa anatase, selanjutnya secara berturut-turut 37.967° , 44.408° , 48.016° , 53.885° , 55.149° , 62.697° , 68.654° , 70.236° , 75.011° , 82.675° . Meninjau dari pola difraksi nano TiO₂ pada penelitian Prawithasari dkk. (2015)

menunjukkan bahwa TiO₂ ini terdiri dari fase anatase, dengan puncak utama pada sudut 2θ sebesar 25.37° , hal ini juga sesuai dengan pembanding standar dari *Inorganic Crystal Structure Database* (ICSD) untuk intensitas 2θ TiO₂ sebesar 25.34° . Karakterisasi menggunakan difraksi sinar-X juga memberikan informasi data FWHM untuk setiap puncak pada 2θ . Data FWHM (*Full Width at Half Maximum*) selanjutnya dimasukkan ke dalam persamaan *scherrer* dengan rumus berikut:

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (1)$$

Dari rumus di atas, β adalah lebar keseluruhan dari puncak difraksimaksimum (FWHM), λ adalah panjang gelombang yang digunakan yaitu 0.15406 nm dan k adalah konstanta material yang nilainya 0.9 (Prawithasari *et al.*, 2015).

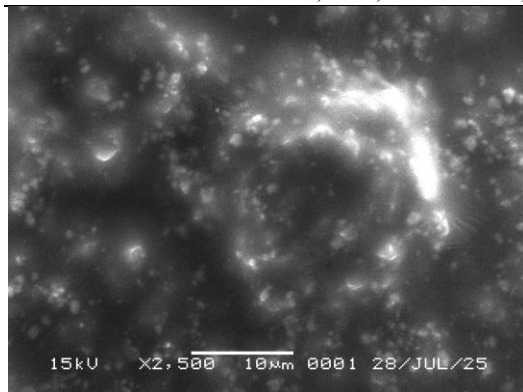
Tabel 1. Hasil FWHM 20 nano TiO₂

No	2θ (°)	FWHM 2θ	D
1	25.2743	0.9792	8.133
2	37.9678	1.3056	6.435
3	44.4088	0.9792	8.763
4	48.0169	0.6528	13.322
5	53.8850	0.6528	13.651
6	55.1499	0.9792	9.153
7	62.6974	0.6528	14.250
8	68.6541	0.6528	14.736
9	70.2364	0.6528	14.878
10	75.0119	0.9792	10.227
11	82.6759	0.816	12.967

Dari Tabel 1. dapat disimpulkan bahwa tersebut TiO₂ yang memiliki ukuran rerata partikel sebesar 11.50 nm. Sehingga, nano TiO₂ SY-TA15 berada pada skala nanometer yaitu sebesar 1-100 nm (Prawithasari *et al.*, 2015).

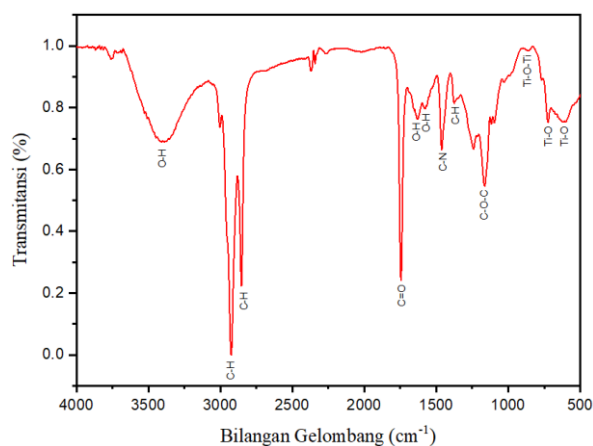
3.2 Karakterisasi Sampel Membran PU-TiO₂ dengan SEM dan FT-IR

Hasil karakterisasi morfologi permukaan membran PU-TiO₂-PEG menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) ditampilkan Pada Gambar 2.



Gambar 2. Mikrograf SEM Membran- TiO_2 .

Hasil Gambar diatas merupakan Membran PU- TiO_2 -PEG dengan perbesaran 2500 $\times$. Pada gambar tersebut permukaan membran memiliki struktur padat berpori halus dengan distribusi TiO_2 yang cukup merata. Pada permukaan tampak jelas permukaan dengan mikrostruktur bertekstur kasar, menunjukkan adanya interaksi antara matriks polimer dengan partikel TiO_2 yang terdispersi.



Gambar 3. Spektrum FT-IR Membran PU- TiO_2 -PEG

Area terang pada citra SEM menandakan keberadaan TiO_2 yang tersebar luas, sedangkan area gelap menunjukkan matriks PU yang menjadi tulang struktural membran. Beberapa partikel pada menunjukkan aglomerasi ringan, namun masih dalam ukuran mikro-nano dan tidak membentuk gumpalan besar.

Menurut Liu dkk (2014) ukuran partikel berukuran kecil sangat penting dalam meningkatkan transfer muatan dan mengurangi rekombinasi pasangan elektron-hole selama proses fotodegradasi

struktur morfologi ini memberikan luas permukaan yang besar, sehingga memperluas daerah kontak antara TiO_2 dan molekul metil jingga. Hal ini penting dalam fotodegradasi, karena lebih banyak luas permukaan aktif yang tersedia untuk pembentukan radikal hidroksil ($\bullet\text{OH}$) dan superoksida (O_2^-) (Liu *et al.*, 2014).

Spektrum FTIR pada Gambar 3. menunjukkan keberadaan gugus fungsional utama penyusun material. Pada Tabel 2 berikut ini adalah puncak dari masing-masing bilangan gelombang.

Tabel 2. Hasil analisis spektrum FT-IR

Bilangan Gelombang (cm^{-1})	Gugus Fungsional	Golongan Senyawa
3338.99	<i>Stretching</i> O-H	Hidroksi
2924.08	<i>Stretching</i> C-H sp^3	Alkana
2854.86	<i>Stretching</i> C-H sp^3	Alkana
1745.58	<i>Stretching</i> C=O	Karbonil uretan
1633.71	<i>Bending</i> O-H	Hidroksi
1581.63	<i>Stretching</i> C-N	Amida
1462.04	<i>Bending</i> C-H sp^3	Alkana
1375.25	<i>Bending</i> C-H sp^3	Alkana
1242.16	<i>Stretching</i> C-O-C	Eter
1165.00	<i>Stretching</i> C-O-C	Eter
1097.50	<i>Stretching</i> C-O-	Eter
866.04	<i>Bending</i> Ti-O	TiO_2
723.31	<i>Stretching</i> Ti-O	TiO_2
603.72	<i>Stretching</i> Ti-O	TiO_2

Serapan pada 3338.99 cm^{-1} menandakan vibrasi *stretching* O-H dan N-H dari penyusun PEG dan segmen uretan. Pita kuat 2924.08 dan 2854.86 cm^{-1} berasal dari *stretching* C-H sp^3 rantai alifatik alkana dari penyusun struktur membran dan isosianat alifatik. Tidak terdeteksinya puncak pita serapan khas isosianat bebas pada sekitar 2300–2200 cm^{-1} mengindikasikan bahwa hampir semua gugus isosianat bereaksi sempurna dengan gugus hidroksil dari minyak biji alpukat dan PEG (Fitriani, Marlina and Khairan, 2016). Selanjutnya, serapan kuat di 1745.58 cm^{-1} dikaitkan dengan *stretching* C=O dari gugus karbonil uretan, sedangkan 1633.71 cm^{-1} berasal dari *bending* O-H. Pita 1581.63 cm^{-1} menunjukkan *stretching* C-N dari struktur amida, didukung oleh *bending* C-H pada 1462.04 dan 1375.25 cm^{-1} . Serapan kuat di 1242.16; 1165.00; dan 1097.50 cm^{-1} menandakan keberadaan

gugus C–O–C dari *Polyethylene Glycol* (PEG) (Socrates, 2001).

Selanjutnya, munculnya pita serapan kuat pada bilangan gelombang sekitar pada 866.04; 723.31; dan 603.72 cm^{-1} menunjukkan vibrasi TiO_2 . Yang mana, ini merupakan karakteristik dari getaran Ti–O dan Ti–O–Ti dalam struktur anatase TiO_2 (Hoffmann *et al.*, 1995; Socrates, 2001; Fujishima and Zhang, 2005).

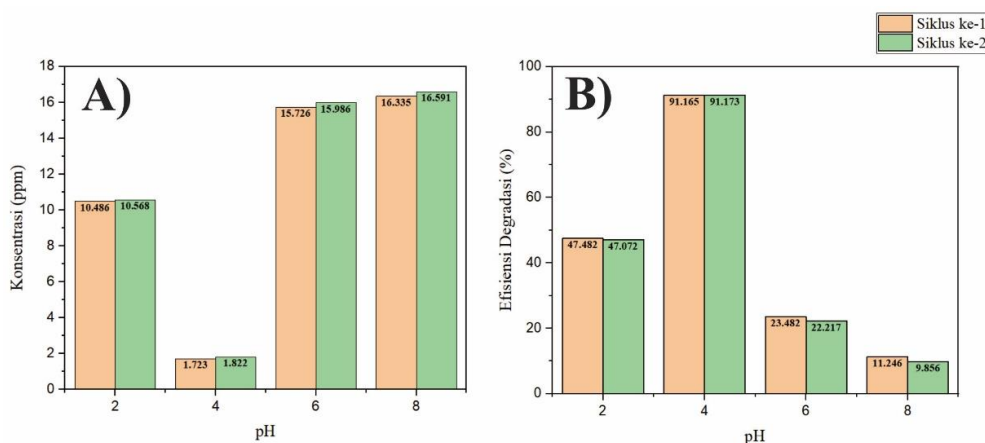
3.3 Aplikasi Fotodegradasi Membran PU- TiO_2 pada Metil Jingga

Penelitian ini mengevaluasi efektivitas fotokatalis nanopartikel TiO_2 dalam membran poliuretan (PU) berbasis minyak biji alpukat, heksametilen diisosianat (HDI), dan *polyethylene glycol* (PEG) yang dimodifikasi mendegradasi metil jingga pada berbagai kondisi pH. Membran yang dihasilkan memiliki ketebalan 0.14 mm dan rasio NCO:OH 2:1. Reaktor fotokatalisis yang digunakan memiliki dimensi 40 × 20

× 15 cm. Bagian dalam reaktor dilapisi aluminium foil untuk meningkatkan reflektansi dan memastikan distribusi cahaya yang lebih efisien. Pencahayaannya diperoleh dari dua lampu UV-A Sangkyo T8 (10 W) dengan panjang gelombang 265 nm. Lampu ditempatkan pada jarak tetap 11 cm dari permukaan sampel untuk memastikan intensitas iradiasi yang konsisten selama proses fotokatalisis. Efisiensi degradasi dihitung berdasarkan selisih konsentrasi awal (C_0) dan Konsentrasi akhir (C_t) setelah penyinaran UV-A selama 240 menit, sebagaimana dijelaskan dalam rumus berikut.

$$ED\% = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100\% \quad (2)$$

Hasil efisiensi degradasi untuk masing-masing pH ditampilkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Penurunan konsentrasi metil jingga dan efisiensi degradasi metil jingga

Pada Gambar 4-A, hasil menunjukkan bahwa pH 4 memberikan penurunan konsentrasi metil jingga tertinggi, mencapai 1.723 ppm dari konsentrasi awal 20 ppm, dengan stabilitas performa yang baik pada siklus pemakaian ulang yaitu sebesar 1.822 ppm. Pada Gambar 4-B, hasil menunjukkan bahwa pH 4 memberikan efisiensi degradasi tertinggi, mencapai 91.165% dengan stabilitas performa yang baik pada siklus pemakaian ulang yaitu sebesar 91.173%. Hal ini dipengaruhi oleh stabilitas membran poliuretan dalam mengimobilisasi TiO_2 , yang berperan penting dalam mempertahankan aktivitas fotokatalitik selama siklus penggunaan ulang. Temuan ini sejalan dengan penelitian $\text{TiO}_2/\text{SBA-15}$ oleh Cho dkk. (2023), di mana imobilisasi TiO_2 pada struktur mesopori mampu

menjaga efisiensi fotodegradasi hingga beberapa siklus dengan performa yang tetap stabil 79.6% (Göl and Akbay, 2023). Hasil ini juga sesuai dengan prinsip fotokatalisis menggunakan TiO_2 , di mana efisiensi degradasi dipengaruhi oleh muatan permukaan fotokatalis dan bentuk ionisasi metil jingga di larutan. Permukaan TiO_2 bermuatan positif pada pH di bawah titik isoelektrik ($pzc = 6.25$) dan negatif pada pH di atasnya (Hadi and Wahab, 2015). Metil jingga sebagai zat warna azo anionik akan berinteraksi lebih efektif dengan permukaan TiO_2 bermuatan positif pada kondisi asam, menghasilkan interaksi yang kuat dan mempercepat proses degradasi.

Efisiensi tinggi pada pH 4 disebabkan oleh kondisi optimum untuk interaksi elektrostatis antara metil jingga bermuatan negatif dengan

permukaan TiO_2 yang bermuatan positif (TiOH_2^+). Interaksi ini meningkatkan transfer elektron dan pembentukan spesies reaktif radikal hidroksil ($\bullet\text{OH}$) dan superoksida (O_2^-), yang secara aktif mendegradasi metil jingga menjadi senyawa yang lebih sederhana (Pant, Park and Park, 2019). Namun, pada kondisi pH yang terlalu asam, pembentukan spesies reaktif berupa radikal hidroksil ($\bullet\text{OH}$) terganggu karena ion H^+ cenderung menangkap elektron bebas dan membentuk gas hidrogen (H_2), bukan radikal oksidatif (Fujishima and Zhang, 2005).

Sebaliknya, pada pH netral dan basa (pH 6 dan 8), permukaan TiO_2 mengalami deprotonasi sehingga didominasi oleh spesies bermuatan netral (TiOH) dan negatif (TiO^-), yang menimbulkan tolakan elektrostatis terhadap molekul metil jingga yang juga bermuatan negatif. Akibatnya, adsorpsi menurun dan efisiensi fotodegradasi menjadi lebih rendah. Rendahnya efisiensi pada pH 6 dan 8 ini menegaskan pentingnya kontrol pH dalam reaksi fotokatalitik. Selain itu, bentuk ionik metil jingga pada pH netral dan basa juga cenderung kurang reaktif terhadap spesies oksidatif yang dihasilkan, sehingga menurunkan efektivitas degradasi. (Kodom *et al.*, 2012; Khalifa, Shaban and Ahmed, 2023).

4. KESIMPULAN

Membran PU berbasis minyak biji alpukat, HDI, dan PEG berhasil disintesis dengan penambahan nanopartikel TiO_2 . Hasil XRD menunjukkan TiO_2 berada pada fasa anatase dengan puncak 2 θ sebesar 25.2740°. Analisis FTIR mengonfirmasi keberadaan gugus fungsi khas PU, yaitu $-\text{NH}$, $-\text{C}=\text{O}$ (karbonil uretan), dan $-\text{C}-\text{O}-\text{C}$ (eter) dari PEG, serta vibrasi $\text{Ti}-\text{O}$ dan $\text{Ti}-\text{O}-\text{Ti}$ sebagai penanda TiO_2 . SEM memperlihatkan morfologi semi-globular dengan distribusi TiO_2 yang merata tanpa aglomerasi signifikan. Aplikasi fotodegradasi Membran PU- TiO_2 -PEG menunjukkan efektivitas tinggi dalam degradasi pewarna metil jingga, dengan efisiensi tertinggi pada pH 4 sebesar 91.165% dengan stabilitas performa yang baik pada siklus pemakaian ulang yaitu sebesar 91.173%. Kinerja menurun pada pH netral dan basa. Efektivitas pada kondisi asam didukung oleh interaksi elektrostatis kuat antara permukaan TiO_2 bermuatan positif dan molekul metil jingga bermuatan negatif, yang

memfasilitasi adsorpsi optimal dan pembentukan radikal reaktif.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad, M. *et al.* (2020) 'Photocatalytic degradation of methyl orange from wastewater using a newly developed Fe-Cu-Zn-ZSM-5 catalyst', *Environmental Science and Pollution Research*, 27(21), pp. 26239–26248. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08940-9>.
- Chong, M.N. *et al.* (2010) 'Recent developments in photocatalytic water treatment technology: A review', *Water Research*, 44(10), pp. 2997–3027. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.02.039>.
- Fitriani, Marlina and Khairan (2016) 'Sintesis Membran Poliuretan Berbasis Minyak Biji Alpukat (Avocado Seed Oil) Dan Heksameten-1,6-Diisosiyanat (HMDI)', *Jurnal Natural*, 16(2), pp. 11–12.
- Fujishima, A. and Zhang, X. (2005) 'Titanium dioxide photocatalysis: present situation and future approaches', *Comptes Rendus. Chimie*, 9(5–6), pp. 750–760. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.crci.2005.02.055>.
- Göl, S.C. and Akbay, E. (2023) 'Reusable TiO_2 -SBA-15 Synthesized by Different Silica/Titania Ratios for Photodegradation', *ChemistrySelect*, 8(43). Available at: <https://doi.org/10.1002/slct.202301887>.
- Hadi, H.M. and Wahab, H.S. (2015) 'Visible light photocatalytic decolourization of methyl orange using n-doped TiO_2 nanoparticles', *Al-Nahrain Journal of Science*, 18(3), pp. 1–9.
- Hoffmann, M.R. *et al.* (1995) 'Environmental Applications of Semiconductor Photocatalysis', *Chemical Reviews*, 95(1), pp. 69–96. Available at: <https://doi.org/10.1021/cr00033a004>.
- Khalifa, Z.S., Shaban, M. and Ahmed, I.A. (2023) 'Photocatalytic Degradation of Methyl Orange and Methylene Blue Dyes by Engineering the Surface Nano-Textures of TiO_2 Thin Films Deposited at Different Temperatures via MOCVD', *Molecules*, 28(3), p. 1160. Available at:

- <https://doi.org/10.3390/molecules28031160>.
- Kodom, T. *et al.* (2012) 'Photocatalytic discoloration of Methyl Orange and indigo carmine on TiO₂ (P25) deposited on conducting substrates: effect of H₂O₂ and S₂O₈²⁻.'
- Liu, N. *et al.* (2014) 'A review on TiO₂-based nanotubes synthesized via hydrothermal method: Formation mechanism, structure modification, and photocatalytic applications', *Catalysis Today*, 225, pp. 34–51. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2013.10.090>.
- Ma, L., Chen, Y. and Zheng, J. (2021) 'An efficient, stable and reusable polymer/TiO₂ photocatalytic membrane for aqueous pollution treatment', *Journal of Materials Science*, 56(19), pp. 11335–11351. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10853-021-06018-6>.
- Nawawi, W.I. *et al.* (2017) 'Immobilized TiO₂-polyethylene glycol: Effects of aeration and pH of methylene blue dye', *Applied Sciences (Switzerland)*, 7(5). Available at: <https://doi.org/10.3390/app7050508>.
- Oyarce, E. *et al.* (2021) 'Polyelectrolytes applied to remove methylene blue and methyl orange dyes from water via polymer-enhanced ultrafiltration', *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(6), p. 106297. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106297>.
- Pant, B., Park, M. and Park, S.-J. (2019) 'Recent Advances in TiO₂ Films Prepared by Sol-Gel Methods for Photocatalytic Degradation of Organic Pollutants and Antibacterial Activities', *Coatings*, 9(10), p. 613. Available at: <https://doi.org/10.3390/coatings9100613>.
- Pelaez, M. *et al.* (2012) 'A review on the visible light active titanium dioxide photocatalysts for environmental applications', *Applied Catalysis B: Environmental*, 125, pp. 331–349. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2012.05.036>.
- Prasetyowati, R. Pratiwi and Fera. (2010) 'Pengambilan Minyak Biji Alpukat (*Persea americana* mill) dengan Metode Ekstraksi', *Jurnal Teknik Kimia*, 17(2).
- Prawithasari, R.E. *et al.* (2015) *Aktivitas Fotokatalitik Nano TiO₂ Terdukung Pada Membran Selulosa Asetat/Nata De Coco (Ca/Ndc) Dalam Reaksi Fotodegradasi Metilen Biru*, *ALCHEMY jurnal penelitian kimia*. Surakarta.
- Saggiaro, E.M. *et al.* (2011) 'Use of Titanium Dioxide Photocatalysis on the Remediation of Model Textile Wastewaters Containing Azo Dyes', *Molecules*, 16(12), pp. 10370–10386. Available at: <https://doi.org/10.3390/molecules161210370>.
- Socrates, G. (2001) *Infrared and Raman Characteristic Group Frequencies Tables and Charts*. 3rd Edition. John Wiley & Sons, Ltd.
- Sonu, K. *et al.* (2021) 'Photocatalytic degradation of MB by TiO₂: studies on recycle and reuse of photocatalyst and treated water for seed germination', *Environmental Science and Pollution Research*, 28(35), pp. 48742–48753. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13863-0>.
- Sugiyarto K.H., S.R.D. (2010) *Kimia Anorganik Logam*. Yogyakarta: Graha Ilmu Press.
- Zhang, J. *et al.* (2022) 'Influence of Dispersed TiO₂ Nanoparticles via Steric Interaction on the Antifouling Performance of PVDF/TiO₂ Composite Membranes', *Membranes*, 12(11). Available at: <https://doi.org/10.3390/membranes12111118>.
- Zhang, J. *et al.* (2024) 'Photocatalysis coupling with membrane technology for sustainable and continuous purification of wastewater', *Separation and Purification Technology*, 329. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.125225>.