

Degradasi Fotokatalitik Senyawa Metilen Biru Dengan Katalis Titania Nanotube

Ilyas Taufik Abdul Aziz¹, Supriyono^{1*}

¹ Program Studi Analisis Kimia, Politeknik AKA Bogor, Bogor,
Jl. Pangeran Sogiri No. 283, Tanah Baru, Kota Bogor, Jawa Barat, 16154, Indonesia

*E-mail: supriyono272@gmail.com

(Received: 25 Maret 2024; Accepted: 15 Juli 2024; Published: 30 Juli 2024)

Abstrak

Pembuatan fotokatalis titania *nanotube* (TiO₂ NT) dan peranannya dalam mendegradasi senyawa metilen biru (MB) telah dilakukan. Tujuan dari riset ini adalah menyelidiki hubungan waktu anodisasi dengan nilai *photocurrent* TiO₂ NT serta menggunakan nilai *photocurrent* sebagai dasar pemilihan waktu optimum sintesis TiO₂ NT untuk mendegradasi MB. Riset diawali dengan melakukan anodisasi lempengan Ti dengan variasi waktu anodisasi antara 30-180 menit untuk menghasilkan TiO₂ NT. Selanjutnya dilakukan pengukuran nilai *photocurrent* TiO₂ NT yang telah dihasilkan dan ditentukan waktu anodisasi yang dapat menghasilkan TiO₂ NT dengan nilai *photocurrent* tertinggi. Material TiO₂ NT dengan nilai *photocurrent* tertinggi dikarakterisasi dengan spektrofotometer FTIR, SEM-EDS dan diuji aktivitas degradasi fotokatalitiknya pada MB. TiO₂ NT yang disintesis dengan waktu anodisasi 180 menit menunjukkan nilai *photocurrent* sebesar 165 μ A (tertinggi). Hasil karakterisasi FTIR menunjukkan serapan pada bilangan gelombang 554 cm^{-1} (vibrasi ikatan Ti-O) dan 593 cm^{-1} (vibrasi ikatan Ti-O-O). Hasil analisis SEM menunjukkan bahwa TiO₂ yang telah disintesis memiliki bentuk tabung dengan ukuran diameter berkisar antara 118 hingga 150 nm dan distribusinya merata. Karakterisasi dengan EDS menunjukkan bahwa perbandingan titanium dan oksigen pada TiO₂ NT bernilai 1:2. Hasil uji aktivitas degradasi fotokatalitik MB dengan fotokatalis TiO₂ NT menampilkan bahwa semakin lama waktu radiasi UV, maka jumlah MB yang terdegradasi oleh TiO₂ NT semakin meningkatkan. Efisiensi degradasi tertinggi dari TiO₂ NT (47,73%) dicapai pada waktu radiasi 360 menit. Degradasi MB dengan fotokatalis TiO₂ NT mengikuti persamaan reaksi orde satu semu dengan nilai tetapan laju reaksi sebesar 0,0018 menit^{-1} .

Kata kunci: anodisasi, degradasi; metilen biru; titania

Abstract

The preparation of titania nanotube (TiO₂ NT) and its role in methylene blue (MB) compound degradation have been carried out. The aim of this research is to investigate relationship between anodization time and photocurrent value of TiO₂ NT and use photocurrent as the basis for selecting the optimum time on TiO₂ NT synthesis to MB degradation. The research initiated anodizing Ti plated with varying anodization times between 30-180 minutes to produce TiO₂ NT. Next, the photocurrent value of TiO₂ NT that has been produced is measured and anodization time that produces TiO₂ NT with the highest photocurrent value was determined. The TiO₂ NT materials with the highest photocurrent value was characterized with FTIR spectrophotometer, SEM-EDS, and its photocatalytic degradation activity on MB was tested. TiO₂ NT that was synthesized for 180 minutes shows photocurrent value of 165 μ A (the highest). FTIR characterization results of TiO₂ NT showed absorption at wave number 554 cm^{-1} (Ti-O bond vibration) and 593 cm^{-1} (Ti-O-O bond vibration). The results of TiO₂ SEM analysis show that the synthesized TiO₂ has tube shape with diameter ranging from 118 to 150 nm and the distribution is even. The EDS characterization displays the ratio of titanium and oxygen on TiO₂ was 1:2. The results of the MB photocatalytic degradation activity test show that the longer UV irradiation time, the greater amount of MB that was degraded by TiO₂ NT. The highest degradation efficiency value of TiO₂ NT (47.73%) was achieved at radiation time of 360 minutes. Degradation of MB with TiO₂ NT photocatalyst followed pseudo-first order reaction equation with reaction rate constant of 0.0018 min^{-1} .

Keywords: anodization; degradation; methylene blue; titania

PENDAHULUAN

Metilen biru (MB) merupakan senyawa organik aromatik dengan nama lain 3,7-bis(dimetilamino)-5-fenotiazinium klorida tetra metiltionin klorida dan rumus kimia $C_{16}H_{18}N_3ClS$ (Bello & Olafadehan, 2022; Khan *et al.*, 2019). Berbagai industri seperti farmasi, kertas, percetakan, cat dan tekstil biasa menggunakan MB (Sahu *et al.*, 2020). Di industri, umumnya MB digunakan sebagai bahan pewarna buatan (Li *et al.*, 2023). MB sebagai pewarna buatan memiliki beberapa kelebihan seperti warna yang pekat dan stabil, mudah digunakan, mudah didapatkan dan harga yang ekonomis (Mohadi *et al.*, 2022). Dibalik beberapa keunggulannya, MB juga memiliki beberapa sifat berbahaya seperti karsinogenik, mutagenetik dan toksik yang mana ini dapat berdampak negatif pada kesehatan manusia (Sun *et al.*, 2022). Selain itu, MB juga susah terurai di lingkungan secara alamiah sehingga dapat merusak ekosistem jika dilepas bebas ke lingkungan (Amelia & Maryudi, 2019; Makeswari & Saraswathi, 2020; Wang *et al.*, 2020). Melihat besarnya dampak negatif yang dapat ditimbulkan, maka perlu ada usaha untuk mendegradasinya dari lingkungan.

Teknik-teknik eliminasi dan degradasi MB seperti koagulasi, flokulasi, adsorpsi, oksidasi, biodegradasi, filtrasi dan degradasi fotokatalitik telah dilakukan (Ge *et al.*, 2023; Ihaddaden *et al.*, 2022; Khuluk *et al.*, 2019; Oladoye *et al.*, 2022). Dari beberapa alternatif teknik yang ada, degradasi fotokatalitik lebih banyak dipilih karena efisien, biaya ekonomis dan ramah lingkungan (Debele *et al.*, 2023; Mohamed *et al.*, 2020; Munir *et al.*, 2020). Pada implementasinya, teknik degradasi fotokatalitik memerlukan material fotokatalis yang biasanya berupa oksida logam seperti ZrO_2 , $SrTiO_2$, $BiVO_4$, SnO_2 , Fe_2O_3 , CuO , ZnO , WO_3 , dan TiO_2 (Anucha *et al.*, 2022; Chen *et al.*, 2020; Dutta *et al.*, 2021; Hitam & Jalil, 2020; Liu *et al.*, 2019; Ramesh, 2021; Rani *et al.*, 2022; Sun *et al.*, 2022; Wang *et al.*, 2021). Titania (TiO_2) umum digunakan sebagai fotokatalis karena memiliki beberapa keunggulan seperti toksisitas rendah, kemampuan oksidasi tinggi, harga ekonomis, memiliki stabilitas struktur dan kimia yang baik, dan hidrofobik (Ahmed & Hasan, 2021; Zheng *et al.*, 2023). Beberapa ahli terus melakukan pengembangan dan modifikasi untuk meningkatkan akvitas fotokatalitik TiO_2 , dikarenakan TiO_2 masih memiliki beberapa kekurangan jika digunakan secara langsung sebagai fotokatalis. Kekurangan tersebut diantaranya adalah, nilai energi celah pitanya tinggi (3,2 eV), kecepatan rekombinasi cepat dan kecilnya luas permukaan spesifik (Rosales & Esquivel, 2020). Luas permukaan spesifik fotokatalis merupakan faktor krusial dalam degradasi fotokatalitik karena menjadi tempat terjadinya adsorpsi senyawa dan reaksi fotodegradasi (Pete *et al.*, 2023). Ketika luas permukaan TiO_2 dapat dioptimalkan maka

efisiensinya dalam mendegradasi senyawa semakin meningkat. Beberapa penyesuaian telah dilakukan untuk mengoptimalkan nilai luas permukaan TiO_2 seperti modifikasi pembentukan struktur, *nanorod*, *nanoflowers*, *nanowire*, dan *nanotube* (Coto *et al.*, 2021). Diantara morfologi yang ada, *nanotube* merupakan morfologi TiO_2 yang memiliki luas permukaan yang lebih besar dan efektivitas fotokatalitik yang lebih baik (Pujiastuti *et al.*, 2021). Penelitian yang dilakukan oleh Farrugia *et al.*, (2021) menunjukkan bahwa TiO_2 NT dapat mendegradasi larutan MB di bawah sinar UVA. Penelitian lain melaporkan bahwa di bawah penyinaran UV selama 25 menit, TiO_2 NT yang dibuat dengan suhu kalsinasi 650 °C dapat mendegradasi MB hingga 85%, adapun TiO_2 NT yang dibuat dengan suhu kalsinasi 850 °C dapat mendegradasi MB dalam air sebesar 50% (Ciobanu & Plesco, 2021). Hasil-hasil penelitian ini menunjukkan bahwa fotokatalis TiO_2 NT efektif dalam mendegradasi larutan MB. Beberapa variasi kondisi sintesis TiO_2 NT untuk degradasi MB perlu dilakukan untuk memperoleh TiO_2 NT dengan aktivitas fotokatalitik yang tinggi. Pemilihan fotokatalis dengan aktivitas fotokatalitik tinggi umumnya didasarkan pada hasil karakterisasi struktural dan morfologi atau langsung melakukan pengujian aktivitas fotokatalitiknya. Referensi yang menggunakan nilai *photocurrent* secara langsung sebagai uji pendahuluan dalam memilih TiO_2 NT yang akan diaplikasikan dalam degradasi larutan MB masih terbatas. Studi pendahuluan berdasar nilai *photocurrent* menjadi cepat dan efektif dalam pemilihan fotokatalis TiO_2 NT karena *photocurrent* merupakan teknik yang dapat digunakan mengevaluasi aktivitas suatu fotokatalis (Liu *et al.*, 2012). Pada penelitian ini secara khusus akan digunakan nilai *photocurrent* sebagai indikator utama dalam penentuan waktu anodisasi optimum sintesis TiO_2 NT yang akan digunakan untuk degradasi MB. Selain itu, akan dikaji hubungan antara waktu anodisasi dan nilai *photocurrent* TiO_2 NT. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan pendekatan yang lebih cepat dan efisien dalam pemilihan material fotokatalis untuk degradasi MB.

METODOLOGI

Peralatan dan Bahan

Alat-alat yang digunakan meliputi *power supply* (Merk : Matsusada R4K-80), oven (Merk : Memmert tipe UN55), *furnace* (Merk : Thermo Scientific Thermolyne FB 1315M), *magnetic stirrer* (Merk : Heidolph MR Hei-Tec), batang pengaduk magnet, kertas amplas halus, reaktor untuk pengujian degradasi fotokatalitik, seperangkat alat gelas, kawat platina dan elektroda Ag/AgCl. Instrumen yang digunakan untuk pengukuran dan karakterisasi material meliputi potentiostat (Merk: eDAQ ER466), spektrofotometer UV-Vis (Merk: PharmaSpec UV-1700), spektrometer *Fourier*

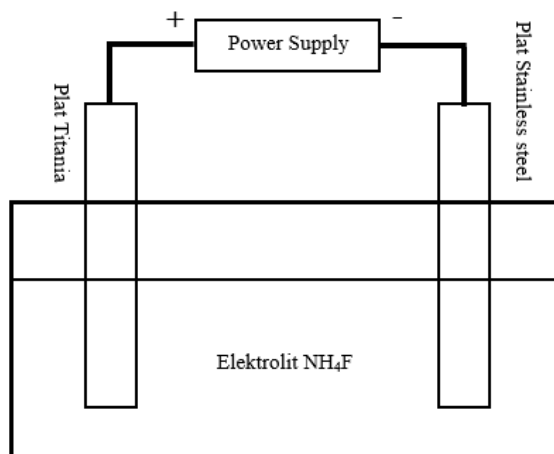
Transform InfraRed (Merk: Bruker Alpha), *Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive Spectrometer* (Merk: PhenomProX).

Selain peralatan yang disebutkan di atas, pada penelitian ini juga menggunakan beberapa jenis bahan yang meliputi lempeng titanium (Ti, 99,6%), lempeng *stainless steel*, akuabides, gliserol, etilen glikol, amonium florida (NH_4F), natrium nitrat (NaNO_3), MB dan etanol. Bahan kimia yang digunakan berasal dari Merck.

Metode Penelitian

Pembuatan dan Karakterisasi TiO_2 NT

Lempengan titanium (Ti, 99,6%) dengan dimensi 50x10x0,5 mm dihaluskan permukaannya dengan teknik pengamplasan menggunakan kertas amplas halus. Lempengan Ti yang telah halus selanjutnya dicuci dan dikeringkan pada temperatur ruang. Tahap berikutnya dilakukan anodisasi untuk membentuk TiO_2 NT. Proses anodisasi melibatkan perendaman lempengan Ti (katoda) dan lempengan *stainless steel* (anoda) ke dalam elektrolit NH_4F 0,25 M dalam gliserol. Skema rangkaian komponen pada proses anodisasi terlihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Skema rangkaian komponen pada proses anodisasi

Proses anodisasi dilakukan dengan memberikan potensial sebesar 40 V dan waktu anodisasi divariasikan antara 30-180 menit dengan interval 30 menit. Pengadukan kontinu dengan pengaduk magnet dilakukan selama anodisasi. Plat yang telah dianodisasi selanjutnya dibersihkan dengan akuabides dan dilanjutkan dengan proses kalsinasi pada suhu 500 °C selama 2 jam. Material yang dihasilkan ditentukan nilai *photocurrent*-nya. Material dengan nilai *photocurrent* tertinggi dianalisa dengan FTIR, SEM-EDS dan diuji aktivitas degradasi fotokatalitiknya.

Penentuan Nilai *Photocurrent* TiO_2 NT

Teknik pengukuran nilai *photocurrent* yang dilakukan pada penelitian ini didasarkan pada

penelitian yang dikerjakan oleh Surahman *et al.*, (2015) dengan dilakukan beberapa penyesuaian. Tahap pertama yang dilakukan adalah pembuatan larutan NaNO_3 0,1 M dengan melarutkan 8,5 gram NaNO_3 menggunakan akuabides di dalam labu takar 1000 mL. Selanjutnya, disusun rangkaian dengan elektrode kerja TiO_2 NT, elektrode pembanding Ag/AgCl dan elektrode *counter* kawat Pt. Semua elektrode kemudian direndam dalam larutan NaNO_3 . Sistem rangkaian yang telah disiapkan dimasukkan ke dalam reaktor uji fotokatalis dan disinari dengan sinar UV. Elektrode-elektrode dihubungkan dengan potensiostat dan nilai *photocurrent* ditentukan dengan teknik amperometri.

Uji Aktivitas Degradasi Fotokatalitik MB dengan Katalis TiO_2 NT

Pengujian aktivitas fotodegradasi TiO_2 NT mengacu pada metode yang dilakukan Costa & Prado, (2009) dengan beberapa penyesuaian.

Penetapan Nilai Panjang Gelombang Maksimum (λ_{max})

Nilai λ_{max} ditentukan dengan melakukan pemindaian larutan MB pada rentang panjang gelombang 200 hingga 750 nm dengan spektrofotometer UV-Vis.

Pembuatan Kurva Hubungan Antara Konsentrasi MB dan Absorbansi

Pembuatan kurva hubungan antara konsentrasi MB dan absorbansinya dimulai dengan pembuatan larutan MB 1000 ppm. Selanjutnya, dari larutan MB 1000 ppm dibuat deret standar dengan konsentrasi 1, 2, 4, 6, 8 dan 10 ppm. Deret standar larutan MB yang telah disiapkan kemudian diukur absorbansinya pada nilai λ_{max} . Kurva kemudian dibuat dengan melakukan plotting antara absorbansi terhadap konsentrasi larutan MB.

Uji Aktivitas Degradasi Fotokatalitik MB dengan Katalis TiO_2 NT

Sebanyak 30 mL larutan MB dengan konsentrasi 4 ppm dimasukkan ke dalam gelas piala. Selanjutnya, lempengan TiO_2 NT yang akan diuji dimasukkan ke dalam larutan MB dan diradiasi dengan sinar UV dengan interval waktu 30, 60, 120, 180, 240, 300, dan 360 menit. Setelah itu, dilakukan pengukuran absorbansi larutan MB pada λ_{max} . Larutan kontrol dianalisa dengan cara yang sama namun tanpa diradiasi dengan sinar UV.

Kinetika laju reaksi fotodegradasi MB dihitung berdasar pada persamaan kinetika orde 1 semu berikut:

$$\ln \left(\frac{C_0}{C_t} \right) = k.t \quad (1)$$

dimana C_0 adalah konsentrasi larutan MB tanpa diradiasi, C_t adalah konsentrasi larutan MB saat diradiasi, k adalah tetapan laju reaksi dan t adalah waktu penyinaran. Konstanta laju reaksi ditentukan

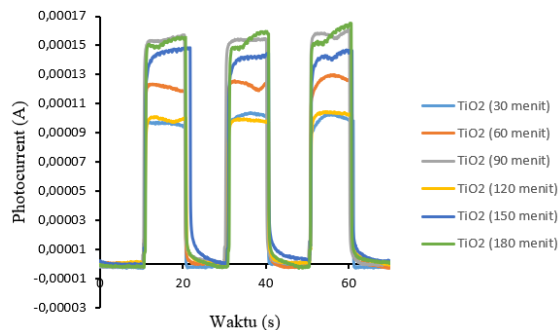
dengan mencari gradien dari kurva $\ln\left(\frac{C_0}{C_t}\right)$ vs t. Nilai efisiensi fotodegradasi pada penelitian ini dihitung dengan persamaan (Naffeti *et al.*, 2023):

$$\% \text{ fotodegradasi} = \left(1 - \frac{C_t}{C_0}\right) \times 100\% \quad (2)$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakterisasi Photocurrent

Uji *photocurrent* dilakukan sebagai uji pendahuluan karena *photocurrent* merupakan metode paling efisien dalam mengevaluasi aktivitas fotokatalitik suatu material fotokatalis. Semakin tinggi nilai *photocurrent* maka efisiensi pemisahan e^-h^+ semakin tinggi sehingga aktivitas fotokatalitik semakin tinggi (Liu *et al.*, 2012). Kurva respon *photocurrent* TiO₂ NT dari beberapa waktu anodisasi terdapat pada Gambar 2.

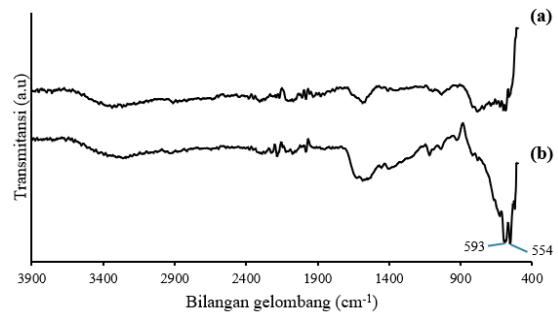


Gambar 2. Kurva respon *photocurrent* TiO₂ NT

Menurut Gambar 2, TiO₂ NT yang disintesis dengan waktu anodisasi berbeda akan menghasilkan nilai *photocurrent* yang berbeda. Adapun nilai *photocurrent* berkisar pada rentang 104 hingga 165 μ A. Nilai *photocurrent* TiO₂ NT cenderung meningkat seiring bertambahnya waktu anodisasi dan nilai *photocurrent* tertinggi diperoleh saat waktu 180 menit. Berdasarkan hasil ini maka TiO₂ NT yang akan dikarakterisasi lebih lanjut dan diuji aktivitas fotokatalitiknya pada degradasi MB adalah TiO₂ NT yang disintesis dengan waktu anodisasi 180 menit.

Karakterisasi Fourier Transform Infra Red (FTIR)

Karakterisasi dengan FTIR digunakan untuk mengidentifikasi jenis gugus fungsi yang terkandung dalam material lempengan titanium (Ti) dan TiO₂ NT. Analisis dilakukan dengan memindai pada rentang bilangan gelombang 400 hingga 4000 cm^{-1} . Spektrum FTIR dari lempengan Ti dan TiO₂ NT ditampilkan pada Gambar 3.

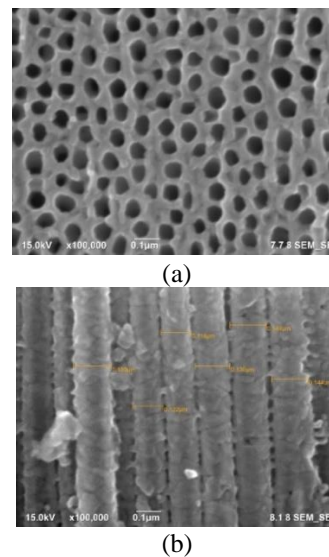


Gambar 3. Spektrum FTIR (a) lempengan Ti dan (b) TiO₂ NT

Spektrum FTIR yang ditunjukkan pada Gambar 3 memperlihatkan bahwa lempengan Ti tidak menunjukkan serapan yang dominan pada rentang bilangan gelombang analisis. Namun, TiO₂ NT menunjukkan serapan yang kuat pada bilangan gelombang 554 cm^{-1} yang mewakili vibrasi ikatan Ti-O dan 593 cm^{-1} yang mewakili vibrasi ikatan Ti-O-O. Keberadaan dua serapan ini menandai terbentuknya TiO₂ (Chelbi *et al.*, 2020).

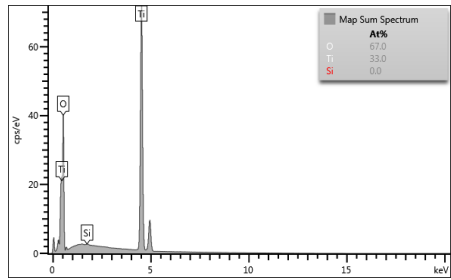
Karakterisasi Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive Spectrometer (SEM-EDS)

Karakterisasi SEM dilakukan untuk melihat morfologi TiO₂ yang terbentuk setelah anodisasi. Gambar SEM dari TiO₂ yang telah disintesis dapat dilihat pada Gambar 4.

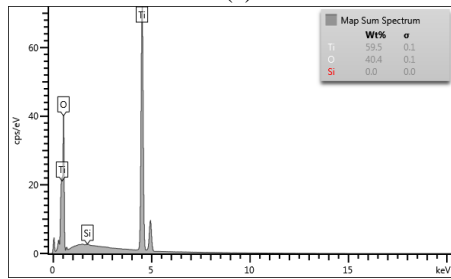


Gambar 4. Hasil analisa SEM TiO₂ NT (a) tampak atas (b) penampang melintang dengan perbesaran 100.000 kali

Berdasarkan Gambar 4, dapat dilihat bahwa TiO₂ yang disintesis memiliki bentuk tabung berukuran nanometer (*nanotube*) dengan diameter antara 118 hingga 150 nm. Struktur tabung ini terdistribusi secara merata. Untuk menganalisa komposisi unsur dalam TiO₂ NT, digunakan EDS. Gambar spektrum EDS TiO₂ NT dapat dilihat pada Gambar 5.



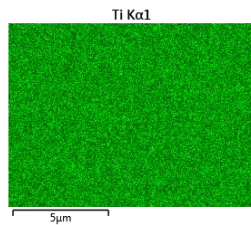
(a)



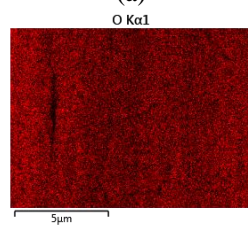
(b)

Gambar 5. Spektrum EDS TiO₂ NT (a) % atom (b) % berat

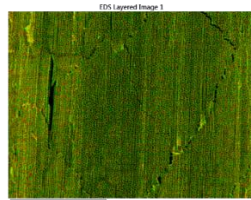
Berdasarkan hasil analisis data EDS pada Gambar 5, diketahui bahwa perbandingan unsur titanium dan oksigen pada permukaan material yang telah dianodisasi sebesar 1:2. Distribusi unsur titanium, oksigen dan senyawa TiO₂ pada permukaan material yang telah dianodisasi terdapat pada Gambar 6.



(a)



(b)



(c)

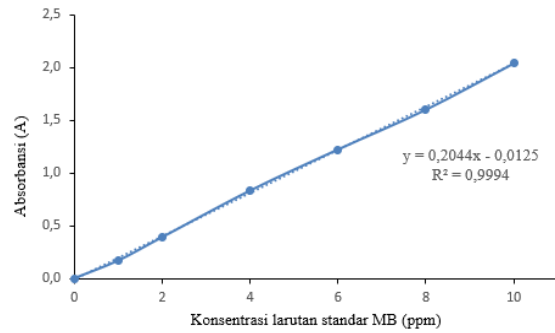
Gambar 6. Hasil pemetaan unsur (a) Ti (b) O (c) TiO₂

Dilihat dari Gambar 6, diketahui bahwa TiO₂ telah terbentuk pada permukaan material. Hasil

pemetaan unsur tersebut juga mengkonfirmasi bahwa proses anodisasi telah merubah permukaan plat Ti menjadi TiO₂.

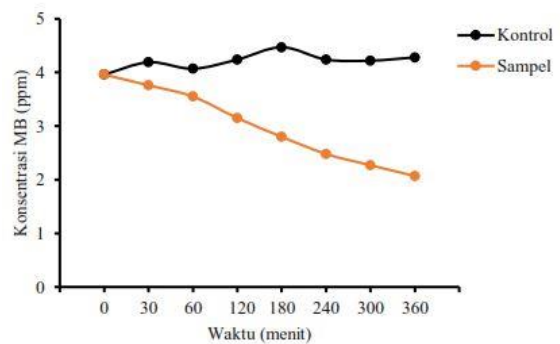
Uji Aktivitas Degradasi Fotokatalitik MB dengan Katalis TiO₂ NT

Pengujian aktivitas degradasi fotokatalitik MB dengan katalis TiO₂ NT dimulai dengan membuat kurva hubungan antara konsentrasi larutan standar MB dan absorbansi seperti pada Gambar 7.



Gambar 7. Kurva hubungan antara konsentrasi MB dan absorbansi

Persamaan regresi linier dari kurva dalam Gambar 7 adalah $y = 0,2044x - 0,0125$. Nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,9994 menunjukkan hubungan yang linier antara konsentrasi larutan MB dan absorbansi. Berdasarkan hal ini maka persamaan regresi yang ada dapat digunakan dalam penentuan konsentrasi MB di dalam larutan. Hasil pengujian degradasi fotokatalitik MB dengan TiO₂ NT saat disinari dengan sinar UV (sampel) dan tidak disinari (kontrol) untuk beberapa variasi waktu terdapat pada Gambar 8.

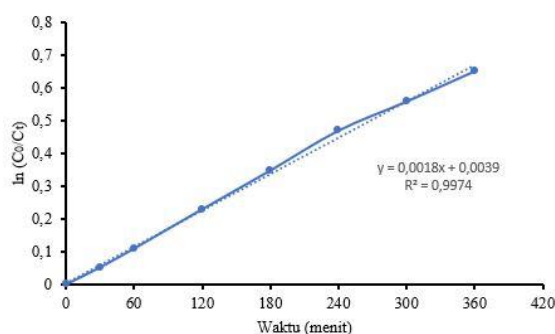


Gambar 8. Kurva degradasi fotokatalitik MB dengan katalis TiO₂ NT

Menurut Gambar 8, dapat dilihat bahwa untuk waktu pengamatan yang sama, kontrol dan sampel menunjukkan nilai konsentrasi yang berbeda, dimana sampel selalu menunjukkan nilai konsentrasi yang lebih rendah jika dibandingkan kontrol. Perbedaan nilai konsentrasi ini menunjukkan bahwa penyinaran dengan sinar UV pada sampel MB yang telah diberi TiO₂ NT dapat

menurunkan nilai konsentrasi MB dalam sampel. Hasil ini menunjukkan bahwa terjadi fotodegradasi MB di dalam larutan. Selain itu, dapat diketahui juga bahwa semakin lama waktu penyinaran UV pada sampel maka jumlah jumlah MB yang terdegradasi oleh TiO₂ NT semakin optimal. Pada penelitian ini efisiensi tertinggi TiO₂ NT dalam mendegradasi MB diperoleh pada waktu penyinaran 360 menit yaitu sebesar 47,73%. Degradasi MB dalam larutan terjadi karena adanya interaksi MB dengan elektron tereksitasi dan *hole*. Elektron tereksitasi dan *hole* dihasilkan dari eksitasi elektron dari pita valensi ke konduksi TiO₂ NT selama penyinaran dengan sinar UV (Priatmoko *et al.*, 2021).

Kurva kinetika reaksi fotodegradasi MB dengan fotokatalis TiO₂ NT tercantum pada Gambar 9.



Gambar 9. Kurva kinetika reaksi fotodegradasi MB dengan fotokatalis TiO₂ NT

Berdasarkan pada Gambar 9 dapat diketahui bahwa hubungan antara $\ln \left(\frac{C_0}{C_t} \right)$ dan t menunjukkan linieritas yang baik ($R^2 = 0,9974$). Hasil ini mengindikasikan bahwa reaksi fotodegradasi MB dengan fotokatalis TiO₂ NT mengikuti persamaan reaksi orde satu semu. Selain itu, didapatkan nilai konstanta laju reaksi fotodegradasi MB dengan fotokatalis TiO₂ NT di bawah penyinaran UV sebesar 0,0018 menit⁻¹.

KESIMPULAN

TiO₂ NT telah diperoleh dengan diameter tabung sebesar 118 hingga 150 nm. Semakin lama proses anodisasi dilakukan, maka nilai *photocurrent* TiO₂ NT cenderung meningkat dan nilai *photocurrent* TiO₂ NT tertinggi (165 μ A) diperoleh pada waktu anodisasi 180 menit. TiO₂ NT yang telah disintesis dengan waktu anodisasi 180 menit dapat mendegradasi MB di bawah radiasi sinar UV. Waktu radiasi UV mempengaruhi jumlah MB yang terdegradasi, di mana semakin lama waktu penyinaran maka jumlah MB yang terdegradasi semakin banyak. Efisiensi fotodegradasi tertinggi (47,73%) dicapai pada waktu radiasi 360 menit. Kinetika degradasi MB dengan katalis TiO₂ NT mengikuti persamaan reaksi orde satu semu dengan tetapan laju reaksi sebesar 0,0018 menit⁻¹. Hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai landasan

dalam pembuatan fotokatalis berbasis TiO₂ NT untuk pemurnian air yang tercemar pewarna sintetik seperti MB.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmed, R. M., Hasan, I. (2021). A review on properties and applications of TiO₂ and associated nanocomposite materials. *Materials Today: Proceedings*, 81(2), 1073–1078.
- Amelia, S., & Maryudi, M. 2019. Application of Natural Zeolite in Methylene Blue Wastewater Treatment Process by Adsorption Method. *Jurnal Bahan Alam Terbarukan*, 8(2), 144–147.
- Anucha, C. B., Altin, I., Bacaksiz, E., Stathopoulos, V. N. (2022). Titanium dioxide (TiO₂)-based photocatalyst materials activity enhancement for contaminants of emerging concern (CECs) degradation: In the light of modification strategies. *Chemical Engineering Journal Advances*, 10,100262.
- Bello, V. E., & Olafadehan, O. A. (2022). Evaluation of Heterocyclic Aromatic Compound Dye (Methylene Blue) on Chitosan Adsorbent Sourced from African Snail Shell: Modelling and Optimization Studies. *In Journal of Applied Science & Process Engineering*, 9(1), 1054-1091.
- Chelbi, S., Djouadi, D., Chelouche, A., Hammiche, L., Touam, T., Doghmane, A. (2020). Effects of Ti-precursor concentration and annealing temperature on structural and morphological properties of TiO₂ nano-aerogels synthesized in supercritical ethanol. *SN Applied Sciences*, 2(5), 1–10.
- Chen, S. H., Jiang, Y. S., Lin, H. Y. (2020). Easy Synthesis of BiVO₄ for Photocatalytic Overall Water Splitting. *ACS Omega*, 5(15), 8927–8933.
- Ciobanu, V., Plesco, I. (2021). TiO₂ Nanotube For Photocatalytic Degradation of Methylene Blue. *Industrial Engineering Materials Science and New Technologies*, 18(1), 23-30.
- Costa, L.L., & Prado, A.G.S. (2009). TiO₂ nanotube as recyclable catalyst for efficient photocatalytic degradation of indigo carmine dye. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 201, 45-49.
- Coto, M., Troughton, S. C., Knight, P., Joshi, R., Francis, R., Kumar, R. V., Clyne, T. W. (2021). Optimization of the microstructure of TiO₂ photocatalytic surfaces created by Plasma Electrolytic Oxidation of titanium substrates. *Surface and Coatings Technology*, 411, 127000.
- Debele, E. T., Desissa, T. D., Zelekew, O. A., Bakare, F. F., Feyisa, G. B., Wondimu, T. H. (2023). Plant-Mediated Synthesis of Ni-

- Doped CuO and Fe₂O₃ Nanocomposite for Photodegradation of Methylene Blue Dye. *Journal of Nanomaterials*, 2023, 1-12.
- Dutta, V., Sharma, S., Raizada, P., Thakur, V. K., Khan, A. A. P., Saini, V., Asiri, A. M., Singh, P. (2021). An overview on WO₃ based photocatalyst for environmental remediation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(1), 105018.
- Farrugia, C., Mauro, A.D., Lia, F., Zammit, E., Rizzo, A., Privitera, V., Impellizzeri, G., Buccheri, M.A., Rappazzo, G., Grech, M., Refalo, P., Abela, S. (2021). Suitability of Different Titanium Dioxide Nanotube Morphologies for Photocatalytic Water Treatment. *Nanomaterials*, 11, 1-18.
- Ge, Q., Li, P., Liu, M., Xiao, G., Xiao, Z., Mao, J., Gai, X. (2023). Removal of methylene blue by porous biochar obtained by KOH activation from bamboo biochar. *Bioresources and Bioprocessing*, 10(1), 1-14.
- Hitam, C. N. C., & Jalil, A. A. (2020). A review on exploration of Fe₂O₃ photocatalyst towards degradation of dyes and organic contaminants. *Journal of Environmental Management*, 258, 110050.
- Ihaddaden, S., Aberkane, D., Boukerroui, A., Robert, D. (2022). Removal of methylene blue (basic dye) by coagulation-flocculation with biomaterials (bentonite and *Opuntia ficus indica*). *Journal of Water Process Engineering*, 49, 1-12.
- Khan, I., Saeed, K., Khan, I. (2019). Nanoparticles: Properties, applications and toxicities. *Arabian Journal of Chemistry*, 12(7), 908–931.
- Khuluk, R. H., Rahmat, A., Buhani, Suharso. (2019). Removal of Methylene blue by adsorption onto activated carbon from coconut shell (*Cocous Nucifera L.*). *Indonesian Journal of Science and Technology*, 4(2), 229–240.
- Li, S., Cui, Y., Wen, M., Ji, G. (2023). Toxic Effects of Methylene Blue on the Growth, Reproduction and Physiology of *Daphnia magna*. *Toxics*, 11(7), 594.
- Liu, Y., Xie, C., Li, J., Zou, T., Zeng, D. (2012). New insight into relationship between photocatalytic activity and photocurrent of TiO₂/WO₃ nanocomposite. *Applied Catalyst A: General*, 433, 81-87.
- Liu, Z., Zhang, Y., Kong, L., Liu, L., Luo, J., Liu, B., Zhou, Q., He, F., Xu, D., Wu, Z. (2019). Preparation and preferential photocatalytic degradation of acephate by using the composite photocatalyst Sr/TiO₂-PCFM. *Chemical Engineering Journal*, 374, 852–862.
- Makeswari, M., & Saraswathi, P. (2020). Photocatalytic degradation of methylene blue and methyl orange from aqueous solution using solar light onto chitosan bi-metal oxide composite. *SN Applied Sciences*, 2(3), 1-12.
- Mohadi, R., Siregar, P. M. S. B. N., Palapa, N. R., Lesbani, A. (2022). Preparation of Zn/Al-chitosan Composite for the Selective Adsorption of Methylene Blue Dye in Water. *Makara Journal of Science*, 26(2), 128–136.
- Mohamed, A., Yousef, S., Nasser, W. S., Osman, T. A., Knebel, A., Sánchez, E. P. V., Hashem, T. (2020). Rapid photocatalytic degradation of phenol from water using composite nanofibers under UV. *Environmental Sciences Europe*, 32(1), 1-8.
- Munir, M., Nazar, M. F., Zafar, M. N., Zubair, M., Ashfaq, M., Hosseini-Bandegharaei, A., Khan, S. U. D., Ahmad, A. (2020). Effective Adsorptive Removal of Methylene Blue from Water by Didodecyltrimethylammonium Bromide-Modified Brown Clay. *ACS Omega*, 5(27), 16711–16721.
- Naffeti, M., Zaibi, M.A., Nefzi, C., Garcia-Arias, A.V., Chtourou, R., Postigo, P.A. (2023). Highly efficient photodegradation of methylene blue by a composite photocatalyst of bismuth nanoparticles on silicon nanowires. *Environmental Technology & Innovation*, 30, 103133.
- Oladoye, P. O., Ajiboye, T. O., Omotola, E. O., Oyewola, O. J. (2022). Methylene blue dye: Toxicity and potential elimination technology from wastewater. *Results in Engineering*, 16, 100678.
- Pete, K. Y., Kabuba, J., Otieno, B., Ochieng, A. (2023). Modeling adsorption and photocatalytic treatment of recalcitrant contaminant on multi-walled carbon/TiO₂ nanocomposite. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(41), 94154–94165.
- Priatmoko, S., Widhiastuti, E., Widiarti, N., Subagja, D. (2021). Synthesis of Ni/NiO-TiO₂ using sol-gel method and its activity in blue methylene degradation. *Journal of Physics: Conference Series*, 1918(3), 1-6.
- Pujiastuti, H., Kustiningsih, I., Slamet. (2021). Improvement of the Efficiency of TiO₂ Photocatalysts with Natural Dye Sensitizers Anthocyanin for the Degradation of Methylene Blue: Review. *Jurnal Rekayasa Kimia dan Lingkungan*. 16(2), 84-99.
- Ramesh, M. (2021). CuO as efficient photo catalyst for photocatalytic decoloration of wastewater containing Azo dyes. *Water Practice and Technology*, 16(4), 1078–1090.
- Rani, V., Sharma, A., Kumar, A., Singh, P., Thakur, S., Singh, A., Le, Q.V., Nguyen, V. H., Raizada, P. (2022). ZrO₂-Based Photocatalysts for Wastewater Treatment: From Novel Modification Strategies to Mechanistic Insights. *Catalyst*, 12(11), 1-19.
- Rosales, A., & Esquivel, K. (2020). SiO₂@TiO₂ composite synthesis and its hydrophobic

- applications: A review. *Catalysts*, 10(2), 1-17.
- Sahu, S., Pahi, S., Sahu, J. K., Sahu, U. K., Patel, R. K. (2020). Kendu (*Diospyros melanoxylon* Roxb) fruit peel activated carbon—an efficient bioadsorbent for methylene blue dye: equilibrium, kinetic, and thermodynamic study. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(18), 22579–22592.
- Suharman, H., Supriyono, Krisnadi, Y.K., Gunlazuardi, J. (2015). Modification of Mixed Structure TiO₂ Nanoporous-Nanotube Arrays with CdS Nanoparticle and Their Photoelectrochemical Properties. *Jurnal Sains Materi Indonesia*, 16(3), 118-125.
- Sun, C., Yang, J., Xu, M., Cui, Y., Ren, W., Zhang, J., Zhao, H., Liang, B. (2022). Recent intensification strategies of SnO₂-based photocatalysts: A review. *Chemical Engineering Journal*, 427, 131564.
- Wang, S., Pu, J., Wu, J., Liu, H., Xu, H., Li, X., Wang, H. (2020). SO₄²⁻/ZrO₂ as a solid acid for the esterification of palmitic acid with methanol: Effects of the calcination time and recycle method. *ACS Omega*, 5(46), 30139–30147.
- Wang, W., Zhang, D., Ji, Z., Shao, D., Sun, P., Duan, J. (2021). High efficiency photocatalytic degradation of indoor formaldehyde with silver-doped ZnO/g-C₃N₄ composite catalyst under the synergistic effect of silver plasma effect and heterojunction. *Optical Materials*, 111, 110721.
- Zheng, E., Jiang, F., Feng, G., Hu, Z., Wu, C., Wei, T., Wu, Q., Jiang, W. (2023). Research progress of Fe/C doped titanium dioxide visible light photocatalytic materials. *Journal of Physics: Conference Series*, 2510(1), 1-10.