

Pengaruh Komposisi Nitrogen terhadap Energi Celah Pita dan Aktivitas Fotokatalitik Komposit TiO₂-N/Zeolit

Effect of Nitrogen Composition on Band Gap Energy and Photocatalytic Activity of TiO₂-N/Zeolite Composite

Hanif Mufti Al Islam, Sutisna^{*)} and Lutfi Rohman

Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Jember

Article info

Keywords

band gap,
nitrogen,
photocatalyst,
TiO₂,
Zeolite,

Article history

Received 02-08-2024
Accepted 28-10-2024

<sup>*)Corresponding author
tissutisna@gmail.com</sup>

ABSTRACT

In this study, the application of TiO₂-N/Zeolite composite for photodegradation of Methylene Blue (MB) under UV irradiation has been reviewed. The synthesis of TiO₂-N/Zeolite composite was carried out by hydrothermal method. The synthesis of TiO₂-N/Zeolite composite was varied based on the ratio of urea concentration to TiO₂, where urea is a precursor of nitrogen (N). The purpose of this study was to examine the effect of nitrogen composition on the band gap energy and photocatalytic activity of TiO₂-N/Zeolite composite. UV-Vis DRS test was conducted to determine the band gap energy of each variant of the synthesized sample. Analysis of MB degradation by TiO₂-N/Zeolite composite is explained in this study. For comparison, TiO₂ and TiO₂-N were also tested for their photocatalytic activity and band gap energy characteristics. The results showed that all variants of TiO₂-N/Zeolite composites had higher photocatalytic activity compared to TiO₂-N and TiO₂ in degrading MB. TiO₂-N/Zeolite (1.5) composite, which is the variant with the lowest nitrogen composition, has the highest photocatalytic activity (99%) in degrading MB. Meanwhile, based on UV Vis DRS analysis, the band gap energy of TiO₂-N/Zeolite composite is lower compared to undoped TiO₂. TiO₂-N/Zeolite (5.0) composite, which has the highest nitrogen composition, has the lowest band gap energy (3.311 eV). The conclusion of this research is that the smaller the nitrogen composition in TiO₂-N/Zeolite composite, the greater the photocatalytic activity in degrading MB. The higher the nitrogen composition in TiO₂-N/Zeolite composite, the smaller the band gap energy.

Artikel info

Kata kunci

Energi celah pita,
nitrogen,
fotokatalis,
TiO₂,
Zeolit

Riwayat artikel

Received 02-08-2024
Accepted 28-10-2024

<sup>*)Corresponding author
tissutisna@gmail.com</sup>

ABSTRAK

Dalam penelitian ini, aplikasi komposit TiO₂-N/Zeolit untuk fotodegradasi Methylene Blue (MB) di bawah iradiasi UV telah ditinjau. Sintesis komposit TiO₂-N/Zeolit dilakukan dengan metode hidrotermal. Sintesis komposit TiO₂-N/Zeolit divariasikan berdasarkan rasio konsentrasi urea terhadap TiO₂, dimana urea merupakan prekursor nitrogen (N). Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menguji pengaruh komposisi nitrogen, terhadap energi celah pita dan aktivitas fotokatalitik komposit TiO₂-N/Zeolit. Uji UV-Vis DRS dilakukan untuk mengetahui energi celah pita dari setiap varian sampel hasil sintesis. Analisis degradasi MB oleh komposit TiO₂-

N/Zeorit dijelaskan dalam penelitian ini. Sebagai perbandingan, TiO_2 dan $\text{TiO}_2\text{-N}$ juga diuji aktivitas fotokatalitik dan karakteristik energi celah pitanya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semua varian komposit $\text{TiO}_2\text{-N/Zeorite}$ memiliki aktivitas fotokatalitik yang lebih tinggi dibandingkan dengan $\text{TiO}_2\text{-N}$ dan TiO_2 dalam mendegradasi MB. Komposit $\text{TiO}_2\text{-N/Zeorite}$ (1,5), yang merupakan varian dengan komposisi nitrogen terendah, memiliki aktivitas fotokatalitik tertinggi (99%) dalam mendegradasi MB. Sementara itu, berdasarkan analisis UV Vis DRS, energi celah pita komposit $\text{TiO}_2\text{-N/Zeorite}$ lebih rendah dibandingkan dengan TiO_2 yang tidak terdoping. Komposit $\text{TiO}_2\text{-N/Zeorite}$ (5,0), yang memiliki komposisi nitrogen tertinggi, memiliki energi celah pita terendah (3,311 eV). Kesimpulan dari penelitian ini adalah bahwa semakin kecil komposisi nitrogen pada komposit $\text{TiO}_2\text{-N/Zeorite}$ maka semakin besar kemampuan aktivitas fotokatalitiknya dalam mendegradasi MB. Semakin tinggi komposisi nitrogen dalam komposit $\text{TiO}_2\text{-N/Zeorit}$, semakin kecil energi celah pitanya

PENDAHULUAN

Pencemaran lingkungan disebabkan limbah industri dan kota kian memprihatinkan. Sekitar 80 % air limbah industri dan kota dibuang ke lingkungan tanpa pengolahan, yang berdampak buruk pada lingkungan (Chowdhary *et al.*, 2020). Zat warna merupakan salah satu bahan pencemar air yang menjadi permasalahan serius. Metilen Biru (MB) merupakan zat warna yang paling banyak digunakan dalam industri (Mengting *et al.*, 2019). MB memiliki afinitas yang kuat terhadap air pada kondisi suhu normal dan umumnya sulit untuk terurai dan dihilangkan dari air limbah dengan menggunakan metode pengolahan konvensional (Khan *et al.*, 2022; Oladoye *et al.*, 2022). Pencemaran lingkungan yang disebabkan oleh limbah MB dapat diatasi dengan menggunakan material fotokatalis.

Fotokatalis merupakan bahan semikonduktor dengan fungsi katalitik di bawah iradiasi cahaya (Gholipour *et al.*, 2015; H. Liu *et al.*, 2019). Fotokatalis dapat menstimulasi terbentuknya pasangan *hole* dan elektron di bawah penyinaran cahaya dalam rentang panjang gelombang tertentu dan dapat mengoksidasi serta mendegradasi berbagai senyawa organik dan anorganik (H. Liu *et al.*, 2019). Contoh fotokatalis yang banyak digunakan untuk fotodegradasi adalah Titanium Dioksida (TiO₂). Fotodegradasi menggunakan TiO₂ sebagai fotokatalis merupakan proses oksidasi lanjutan (AOPs) yang sangat menjanjikan untuk mineralisasi senyawa organik di bawah sinar tampak dan/atau UV. TiO₂ secara luas telah digunakan dalam pengolahan air limbah karena berbagai kelebihanannya, diantaranya harga murah, non-toksik, dan stabilitas kimia (Lu *et al.*, 2020; Waghmare *et al.*, 2019).

Sebuah studi yang dilaporkan oleh Matsunami *et al.* (2019) menemukan bahwa TiO₂ memiliki keterbatasan diantaranya laju rekombinasi pasangan *hole*-elektron yang cepat, dan energi celah pita yang lebar. Energi celah pita yang lebar menyebabkan cahaya yang dapat menstimulasi TiO₂ terbatas hanya pada daerah sinar UV, dan ini berdampak pada aktivitas fotokatalitiknya (Chen *et al.*, 2018). Permasalahan energi celah pita yang lebar dapat diatasi dengan melakukan doping terhadap TiO₂ (Yu *et al.*, 2020). TiO₂ yang didoping dengan unsur non logam seperti nitrogen, dapat mempersempit energi celah pita dan meningkatkan sensitivitas material terhadap cahaya tampak (Marques *et al.*, 2019). Salah satu parameter yang mempengaruhi adalah komposisi unsur N yang digunakan sebagai dopan (Marques *et al.*, 2019). Penelitian yang dilakukan Marques *et al.* (2019) dapat dikembangkan dengan penambahan material sorben. Menurut Matsunami *et al.* (2019), TiO₂ mempunyai laju rekombinasi yang tinggi dan daya adsorpsi yang rendah. Zeolit merupakan material sorben yang memiliki pori-pori dan saluran yang seragam, luas permukaan yang tinggi, kapasitas adsorpsi yang tinggi dan stabilitas termal dan mekanik yang baik (S. Liu *et al.*, 2014). Kombinasi sinergis antara zeolit dan TiO₂, tidak hanya mempertahankan sifat intrinsik kedua material secara individual tetapi juga meningkatkan kapasitas adsorpsi dan menekan laju rekombinasi *hole*-elektron melalui distribusi elektron tereksitasi di permukaan zeolit (Kanakaraju *et al.*, 2015).

Dalam penelitian ini, ditinjau sintesis dan aplikasi komposit TiO₂-N/Zeolit untuk fotodegradasi MB di bawah iradiasi UV. Untuk mengetahui parameter sintesis optimum, sintesis komposit TiO₂-N/Zeolit divariasikan berdasarkan rasio konsentrasi urea terhadap TiO₂, dimana urea adalah prekursor dari nitrogen. Uji UV-Vis DRS dilakukan untuk membandingkan dan mengevaluasi perbedaan energi celah pita untuk setiap varian sampel hasil sintesis. Aktivitas fotokatalitik material hasil sintesis dianalisis berdasarkan kemampuannya dalam mendegradasi senyawa warna MB. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh rasio konsentrasi urea dengan TiO₂ (urea:TiO₂), terhadap energi celah pita dan aktivitas fotokatalitik komposit TiO₂-N/Zeolit.

BAHAN DAN METODE

Material utama yang dibutuhkan terdiri atas tiga bagian: material fotokatalis, material dopant, dan material sorben. Material fotokatalis yang digunakan adalah TiO₂ komersil, material dopant berupa nitrogen yang diperoleh dari urea, dan material sorben adalah zeolit alam. Bahan-bahan lainnya yang digunakan dalam penelitian ini adalah aquades, HCl, MB. Tahapan penelitian yang dilakukan antara lain:

Pengayakan dan Aktivasi Zeolit

Pengayakan dilakukan dengan susunan ayakan 150-250 mesh. 100 gram Zeolit yang telah lolos ayakan ukuran 150 mesh dan tidak lolos 250 mesh, diaktivasi dengan merendamnya dalam 250 mL HCl 6 M, dan dibiarkan selama 12 jam. Zeolit yang sudah diaktivasi kemudian disaring dan dicuci dengan aquades sampai pH netral. Zeolit tersebut akhirnya dikeringkan dalam oven pada suhu 100°C selama 3 jam. Dengan demikian proses ini menghasilkan Zeolit alam teraktivasi.

Sintesis TiO₂-N

TiO₂ didispersikan ke dalam larutan urea dengan komposisi yang divariasikan (Tabel 1), kemudian diaduk selama 4 jam dengan *magnetic stirrer*. Campuran dimasukkan ke dalam autoklaf kemudian dipanaskan pada temperatur 180°C selama 12 jam. Setelah pemanasan, campuran dicuci dengan aquades hingga pH netral, kemudian dikeringkan dalam oven listrik pada temperatur 100°C selama 3 jam. Dari proses ini dihasilkan TiO₂-N.

Tabel 1. Komposisi campuran TiO₂-N

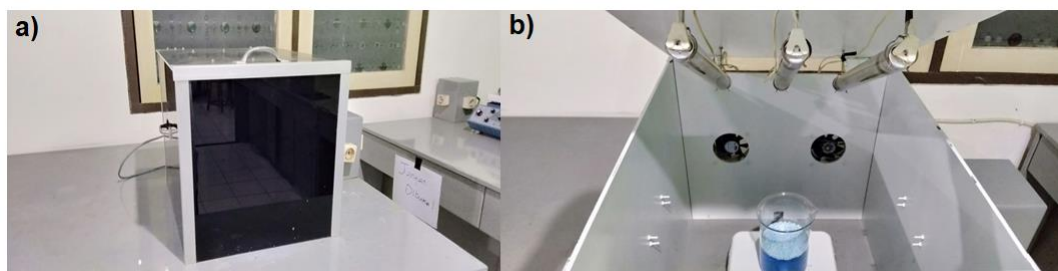
No.	Nama Sampel	Rasio Konsentrasi (TiO ₂ : Urea)
1	TiO ₂ -N (1.5)	3 : 2
2	TiO ₂ -N (3)	3 : 1
3	TiO ₂ -N (5)	5 : 1

Sintesis TiO₂-N/Zeolit

TiO₂-N hasil sintesis dan Zeolit dicampurkan (dengan prosentase 60 banding 40) dalam aquades, kemudian diaduk dengan *magnetic stirrer* selama 2 jam. Campuran dimasukkan dalam autoklaf kemudian dioven pada temperatur 180°C selama 12 jam. Campuran dicuci dengan aquades hingga pH netral, kemudian dikeringkan dalam oven pada temperatur 100°C selama 3 jam. Dari proses ini dihasilkan komposit TiO₂-N/Zeolit.

Uji Aktivitas Fotokatalitik Komposit TiO₂-N/Zeolit

Uji aktivitas fotokatalitik dilakukan dalam UV *chamber* yang di dalamnya terdapat 4 buah lampu UV masing-masing 10 Watt, dan 2 buah kipas (Gambar 1). Larutan MB dengan konsentrasi 40 ppm digunakan sebagai model limbah dalam pengujian. Sebanyak 0,05 g komposit TiO₂-N/Zeolit didispersikan dalam 250 mL larutan MB tersebut. Iradiasi sinar UV dalam UV *chamber* dilakukan selama total waktu 60 menit, dimana setiap 10 menit dilakukan *sampling*. Pada 10 menit pertama, uji aktivitas fotokatalitik dilakukan tanpa iradiasi UV, kemudian 60 menit sisanya dengan iradiasi UV. Absorbansi dari semua hasil *sampling* diukur dengan spektrofotometer UV-Vis. Selain semua varian komposit TiO₂-N/Zeolit, TiO₂-N dan TiO₂ juga digunakan dalam eksperimen fotodegradasi MB ini.



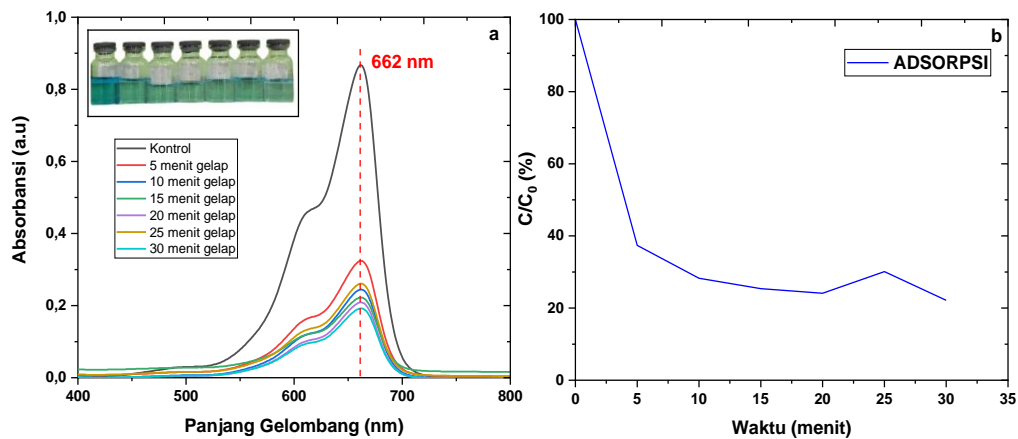
Gambar 1. UV *chamber* : a) Tampilan luar ; b) Tampilan dalam

Karakterisasi

Karakterisasi yang dilakukan adalah karakterisasi UV-Vis DRS, untuk menentukan energi celah pita dari sampel. Sampel yang dikarakterisasi adalah semua komposit TiO₂-N/Zeolit, salah satu varian TiO₂-N, dan TiO₂. Dengan demikian terdapat 5 sampel yang dikarakterisasi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Uji fotodegradasi MB diawali tanpa iradiasi UV untuk mengetahui masa jenuh adsorpsi MB di permukaan komposit $\text{TiO}_2\text{-N/Zeolit}$. Gambar 2a merupakan grafik absorbansi MB terhadap panjang gelombang, dimana puncak absorbansinya berada pada panjang gelombang 662 nm. Berdasarkan Gambar 2a, puncak absorbansi semakin menurun seiring dengan bertambahnya waktu, hal tersebut mengindikasikan proses adsorpsi MB oleh $\text{TiO}_2\text{-N/Zeolit}$ sedang berjalan. Puncak absorbansi yang semakin menurun akibat adsorpsi oleh $\text{TiO}_2\text{-N/Zeolit}$, mengindikasikan konsentrasi MB yang juga menurun sesuai dengan yang ditunjukkan pada Gambar 2b. Akan tetapi, terdapat waktu dimana $\text{TiO}_2\text{-N/Zeolit}$ mengalami kejenuhan sehingga tidak dapat mengadsorpsi MB lagi di permukaannya. Hal ini dikarenakan seluruh permukaan $\text{TiO}_2\text{-N/Zeolit}$ sudah tertutup oleh senyawa MB. Berdasarkan Gambar 1a, masa jenuh adsorpsi $\text{TiO}_2\text{-N/Zeolit}$ dimulai pada menit ke 10. Dengan demikian ditentukan bahwa lama waktu perlakuan tanpa iradiasi UV dilakukan selama 10 menit. Hal tersebut menjadi referensi pada uji aktivitas fotokatalitik untuk sampel lainnya, yakni semua varian komposit $\text{TiO}_2\text{-N/Zeolit}$, $\text{TiO}_2\text{-N}$, dan TiO_2 . Sehingga untuk 10 menit pertama, eksperimen fotodegradasi MB yang diberi perlakuan dengan seluruh varian material di atas, dilakukan tanpa iradiasi UV. Lampu UV baru dihidupkan setelah menit ke-10 eksperimen. Untuk nilai secara spesifik baik puncak absorbansi maupun konsentrasi MB selama perlakuan dengan $\text{TiO}_2\text{-N/Zeolit}$ (Tabel 2).



Gambar 2. Grafik reduksi; a) Absorbansi dan b) Konsentrasi dari larutan MB selama perlakuan dengan $\text{TiO}_2\text{-N/Zeolit}$.

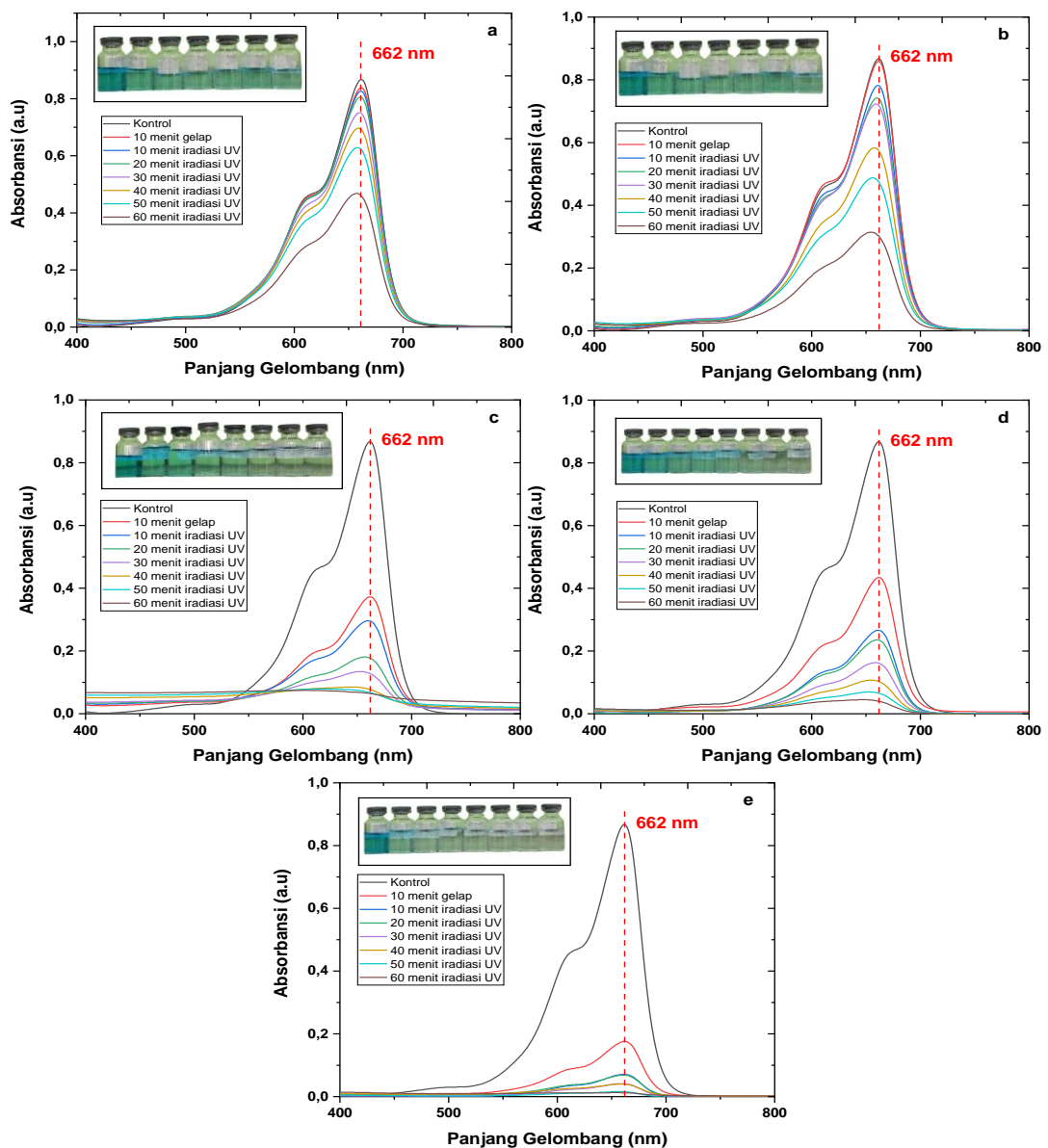
Tabel 2. Data puncak absorbansi dan konsentrasi MB dari perlakuan oleh $\text{TiO}_2\text{-N/Zeolit}$

Panjang Gelombang (nm)	Waktu (menit)	Absorbansi (a.u)	C/C ₀ (%)
662	0	0,867	100
662	5	0,324	37,37024
662	10	0,245	28,25836
662	15	0,22	25,37486
662	20	0,209	24,10611
662	25	0,261	30,10381
662	30	0,192	22,14533

Gambar 3a dan 3b merupakan spektrum absorbansi larutan MB sebagai fungsi panjang gelombang, selama diberi perlakuan dengan TiO_2 dan $\text{TiO}_2\text{-N}$. Berdasarkan Gambar 3a dan 3b, pada 10 menit pertama, terjadi penurunan puncak absorbansi meskipun tidak signifikan jika dibandingkan dengan penurunan puncak absorbansi larutan MB yang diberi

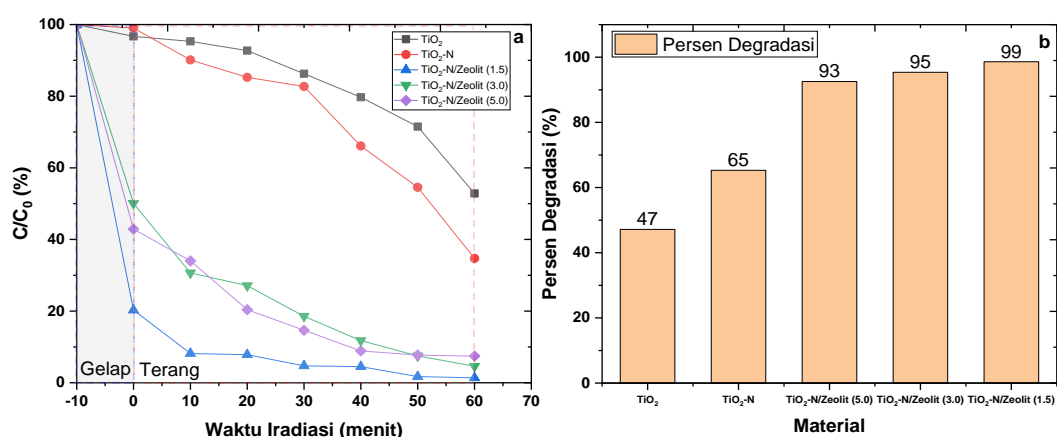
perlakuan dengan varian komposit $\text{TiO}_2\text{-N}/\text{Zeolit}$ (lihat Gambar 3c hingga 3e). Hal tersebut dikarenakan TiO_2 dan $\text{TiO}_2\text{-N}$ sama-sama memiliki kemampuan adsorpsi yang rendah. Sementara semua varian komposit $\text{TiO}_2\text{-N}/\text{Zeolit}$, dikarenakan kehadiran zeolit, memiliki daya adsorpsi yang tinggi.

Penurunan puncak absorbansi larutan MB mengindikasikan penurunan konsentrasi, seperti ditunjukkan pada Gambar 4a. Berdasarkan Gambar 4a, terdapat dua bagian yakni gelap dan terang. Bagian gelap merepresentasikan persentase konsentrasi MB yang tersisa setelah perlakuan dengan berbagai varian material tanpa iradiasi UV, sedangkan bagian terang merepresentasikan persentase konsentrasi MB yang tersisa setelah perlakuan dengan berbagai varian material disertai iradiasi UV. Diperoleh bahwa semua varian $\text{TiO}_2\text{-N}/\text{Zeolit}$ mampu mereduksi konsentrasi MB lebih baik daripada TiO_2 dan $\text{TiO}_2\text{-N}$. Hal tersebut dikarenakan dalam komposit $\text{TiO}_2\text{-N}/\text{Zeolit}$ terjadi 2 mekanisme yang bersinergi yakni mekanisme adsorpsi dan mekanisme fotokatalitik, sedangkan pada TiO_2 dan $\text{TiO}_2\text{-N}$ hanya ada 1 mekanisme yakni fotokatalitik.



Gambar 3. Grafik Absorbansi MB yang diberi perlakuan dengan : a) TiO_2 ; b) $\text{TiO}_2\text{-N}$; c) $\text{TiO}_2\text{-N}/\text{Zeolit}$ (5.0) ; d) $\text{TiO}_2\text{-N}/\text{Zeolit}$ (3.0) ; e) $\text{TiO}_2\text{-N}/\text{Zeolit}$ (1.5).

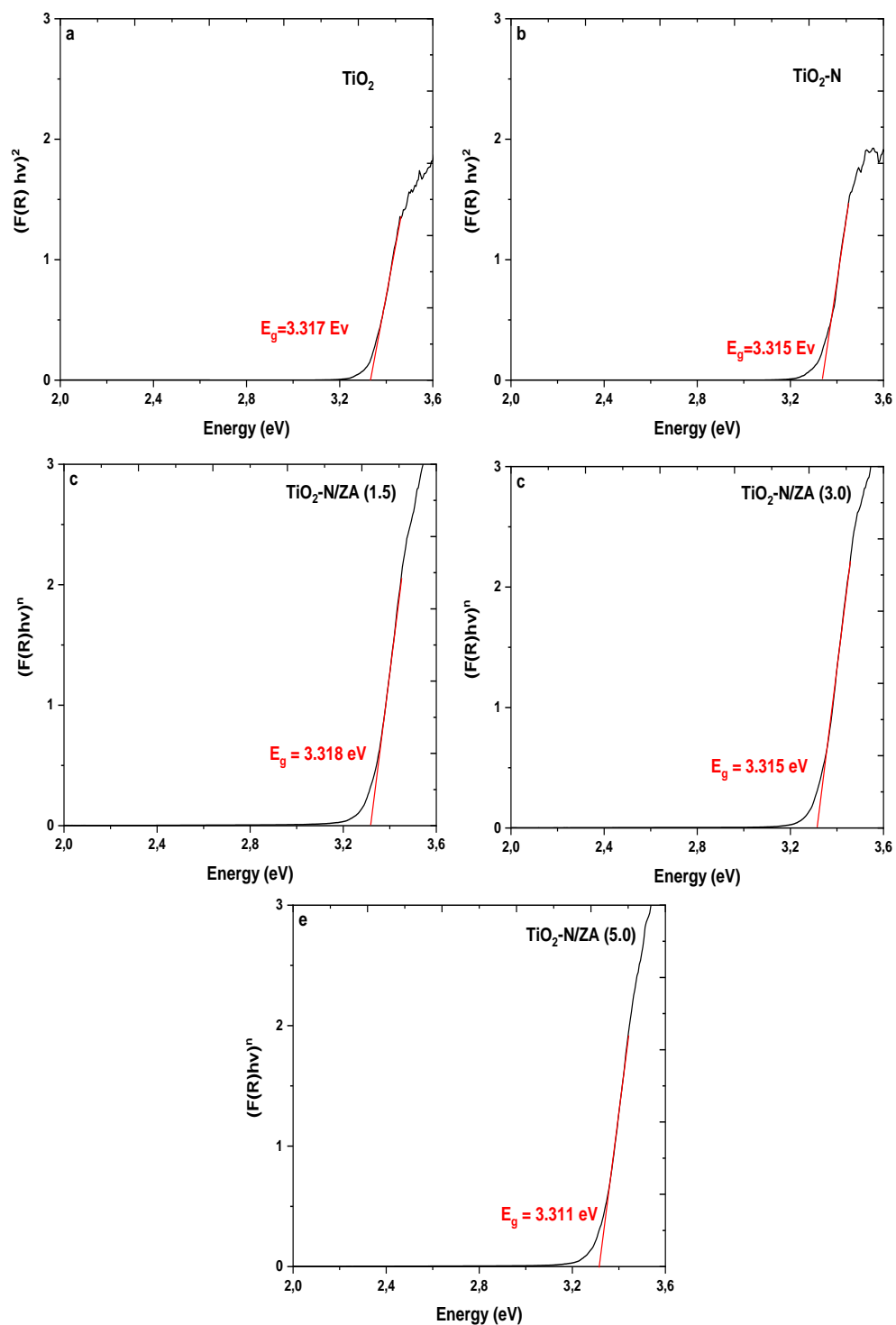
Selanjutnya, Gambar 4b merupakan visualisasi diagram batang persentase reduksi MB terhadap semua varian. Komposit $\text{TiO}_2\text{-N}/\text{Zeolit}$ (1,5) memiliki kemampuan dalam mereduksi MB yang paling tinggi yakni 99%, disusul dengan $\text{TiO}_2\text{-N}/\text{Zeolit}$ (3.0), $\text{TiO}_2\text{-N}/\text{Zeolit}$ (5.0), $\text{TiO}_2\text{-N}$, dan terakhir TiO_2 . Komposit $\text{TiO}_2\text{-N}/\text{Zeolit}$ (1.5) merupakan varian yang memiliki komposisi nitrogen paling rendah dibandingkan dengan varian komposit $\text{TiO}_2\text{-N}/\text{Zeolit}$ (3.0) dan $\text{TiO}_2\text{-N}/\text{Zeolit}$ (5.0). Terlihat bahwa semakin kecil komposisi nitrogen dalam komposit $\text{TiO}_2\text{-N}/\text{Zeolit}$, semakin besar kemampuannya dalam mendegradasi MB. Menurut Marques *et al.* (2019), komposisi nitrogen yang semakin tinggi dapat menutupi permukaan fotokatalis, sehingga menghalangi kristalit TiO_2 dan akibatnya menurunkan jumlah situs adsorpsi pada permukaan untuk molekul MB. Komposisi nitrogen mempengaruhi permukaan luas permukaan spesifik dari kristal, dimana komposisi nitrogen yang semakin tinggi menyebabkan penurunan luas permukaan spesifik, sebagaimana penelitian yang telah dilakukan oleh Marques *et al.* (2019). Secara umum, luas permukaan spesifik yang lebih besar berindikasi pada kemampuan adsorpsi yang lebih baik dan menyediakan lebih banyak situs aktif dalam reaksi fotokatalitik (Sutisna *et al.*, 2023).



Gambar 4. Grafik reduksi; a) Absorbansi dan b) Konsentrasi dari larutan MB selama perlakuan dengan $\text{TiO}_2\text{-N}/\text{Zeolit}$.

Gambar 5a hingga 5e merupakan grafik yang digunakan untuk menentukan energi celah pita material berdasarkan data spektrum reflektansi UV-Vis. Berdasarkan plot grafik yang didapatkan kemudian dicari kemiringan (*slope*) dan ditarik garis linear. Perpotongan antara garis linear dengan sumbu horizontal menunjukkan energi celah pita dari material hasil sintesis (Tabel 3).

Sampel $\text{TiO}_2\text{-N}$ memiliki energi celah pita lebih sempit dibandingkan sampel TiO_2 , sementara komposit $\text{TiO}_2\text{-N}/\text{Zeolit}$ (1.5) memiliki energi celah pita yang lebih lebar dibandingkan $\text{TiO}_2\text{-N}$ dan TiO_2 . Untuk varian komposit $\text{TiO}_2\text{-N}/\text{Zeolit}$, komposisi N berpengaruh terhadap lebar energi celah pita, dimana semakin tinggi komposisi N nya maka semakin sempit energi celah pitanya. Berdasarkan data Tabel 3, didapatkan bahwa: 1) adanya zeolit, menyebabkan energi celah pita semakin lebar, hal tersebut bersesuaian dengan penelitian yang dilakukan oleh Alvarez *et al.* (2018) ; 2) Semakin tinggi komposisi nitrogen dalam komposit $\text{TiO}_2\text{-N}/\text{Zeolit}$, menyebabkan energi celah pitanya semakin sempit (Marques *et al.*, 2019). Energi celah pita yang semakin sempit dikarenakan komposisi nitrogen yang semakin besar, merupakan sesuatu yang diharapkan, dan ini bersesuaian dengan penelitian terdahulu. Doping nitrogen pada TiO_2 akan membentuk keadaan energi celah tengah baru atom N pada orbital $2p$ di atas pita valensi atom O pada orbital $2p$. Dengan demikian, energi celah pita TiO_2 yang didoping dengan nitrogen akan mengalami penyempitan dan menggeser penyerapan optik ke daerah sinar tampak (Ansari *et al.*, 2016). Pergeseran penyerapan optik ke daerah sinar tampak mempengaruhi aplikasi praktis dari material dalam mendegradasi MB, yakni aktivasi material fotokatalis tidak terbatas dengan iradiasi UV, melainkan dapat dengan sinar tampak.



Gambar 5. Plot akar kuadrat Kubelka Munk terhadap energi (eV) dari masing-masing sampel: a) TiO_2 ; b) TiO_2-N ; c) $TiO_2-N/Zeolit (1.5)$; d) $TiO_2-N/Zeolit (3.0)$; e) $TiO_2-N/Zeolit (5.0)$.

Tabel 3. Data energi celah pita (eV) masing-masing sampel.

No	Nama Sampel	Energi Celah Pita (eV)
1	TiO ₂	3.317
2	TiO ₂ -N	3.315
3	TiO ₂ -N/Zeolit (1.5)	3.318
4	TiO ₂ -N/Zeolit (3.0)	3.315
5	TiO ₂ -N/Zeolit (5.0)	3.311

KESIMPULAN

Sintesis komposit TiO₂-N/Zeolit melalui metode hidrotermal telah berhasil dilakukan. TiO₂-N/Zeolit divariasikan berdasarkan rasio konsentrasi urea terhadap TiO₂, dimana urea adalah prekursor dari nitrogen. Penerapan komposit TiO₂-N/Zeolit untuk fotodegradasi MB telah ditinjau di bawah iradiasi UV. Komposit TiO₂-N/Zeolit mampu mendegradasi MB lebih baik dibandingkan dengan TiO₂-N dan TiO₂. Komposisi nitrogen berpengaruh terhadap aktivitas fotokatalitik komposit TiO₂-N/Zeolit. Komposisi nitrogen yang semakin rendah, berpengaruh terhadap aktivitas fotokatalitiknya yang semakin tinggi. Varian komposit TiO₂-N/Zeolit (1.5) memiliki aktivitas fotokatalitik paling tinggi dalam mendegradasi MB yakni 99%, diikuti oleh TiO₂-N/Zeolit (3.0) dengan aktivitas fotokatalitik sebesar 95%, dan TiO₂-N/Zeolit (5.0) dengan aktivitas fotokatalitik sebesar 93%. Diperoleh juga bahwa semakin tinggi komposisi nitrogen dalam komposit TiO₂-N/Zeolit, semakin sempit energi celah pitanya. Implikasi celah pita yang semakin sempit adalah pergeseran penyerapan optik, sehingga material dalam hal ini tidak terbatas dapat diaktivasi oleh sinar UV, melainkan sinar tampak.

DAFTAR PUSTAKA

- Alvarez, K. M., Alvarado, J., Soto, B. S., & Hernandez, M. A. (2018). Synthesis of TiO₂ nanoparticles and TiO₂-Zeolite composites and study of optical properties and structural characterization. *Optik*, 169(May), 137–146. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2018.05.028>
- Ansari, S. A., Khan, M. M., Ansari, M. O., & Cho, M. H. (2016). Nitrogen-doped titanium dioxide (N-doped TiO₂) for visible light photocatalysis. *New Journal of Chemistry*, 40(4), 3000–3009. <https://doi.org/10.1039/c5nj03478g>
- Chen, Y., Jiang, Y., Wang, X., & Deng, Q. (2018). Preparation And Photocatalytic Performance Of F- TiO₂ Photocatalyst To. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science PAPER*.
- Chowdhary, P., Bharagava, R. N., Mishra, S., & Khan, N. (2020). Role of Industries in Water Scarcity and Its Adverse Effects on Environment and Human Health. In V. Shukla & N. Kumar (Eds.), *Environmental Concerns and Sustainable Development* (pp. 235–256). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-13-5889-0_12
- Gholipour, M. R., Dinh, C. T., Béland, F., & Do, T. O. (2015). Nanocomposite heterojunctions as sunlight-driven photocatalysts for hydrogen production from water splitting. *Nanoscale*, 7(18), 8187–8208. <https://doi.org/10.1039/c4nr07224c>
- Kanakaraju, D., Kockler, J., Motti, C. A., Glass, B. D., & Oelgemöller, M. (2015). Titanium dioxide/zeolite integrated photocatalytic adsorbents for the degradation of amoxicillin. *Applied Catalysis B: Environmental*, 166–167, 45–55. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2014.11.001>
- Khan, I., Saeed, K., Zekker, I., Zhang, B., Hendi, A. H., Ahmad, A., Ahmad, S., Zada, N., Ahmad, H., Shah, L. A., Shah, T., & Khan, I. (2022). Review on Methylene Blue: Its Properties, Uses, Toxicity and Photodegradation. *Water*, 14(242), 1–30. <https://doi.org/10.5040/9781501365072.12105>

- Liu, H., Yu, D., Sun, T., Du, H., Jiang, W., Muhammad, Y., & Huang, L. (2019). Fabrication of surface alkalized g-C₃N₄ and TiO₂ composite for the synergistic adsorption-photocatalytic degradation of methylene blue. *Applied Surface Science*, *473*, 855–863. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.12.162>
- Liu, S., Lim, M., & Amal, R. (2014). TiO₂-coated natural zeolite: Rapid humic acid adsorption and effective photocatalytic regeneration. *Chemical Engineering Science*, *105*, 46–52. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2013.10.041>
- Lu, X., Li, X., Chen, F., Chen, Z., Qian, J., & Zhang, Q. (2020). Biotemplating synthesis of N-doped two-dimensional CeO₂-TiO₂ nanosheets with enhanced visible light photocatalytic desulfurization performance. *Journal of Alloys and Compounds*, *815*, 152326. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.152326>
- Marques, J., Gomes, T. D., Forte, M. A., Silva, R. F., & Tavares, C. J. (2019). A new route for the synthesis of highly-active N-doped TiO₂ nanoparticles for visible light photocatalysis using urea as nitrogen precursor. *Catalysis Today*, 36–45. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2018.09.002>
- Matsunami, D., Yamanaka, K., Mizoguchi, T., & Kojima, K. (2019). Comparison of photodegradation of methylene blue using various TiO₂ films and WO₃ powders under ultraviolet and visible-light irradiation. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, *369*(July 2018), 106–114. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2018.10.020>
- Mengting, Z., Kurniawan, T. A., Fei, S., Ouyang, T., Othman, M. H. D., Rezakazemi, M., & Shirazian, S. (2019). Applicability of BaTiO₃/graphene oxide (GO) composite for enhanced photodegradation of methylene blue (MB) in synthetic wastewater under UV-vis irradiation. *Environmental Pollution*, 255. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113182>
- 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*(September), 100678. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100678>
- Sutisna, Wibowo, E., & Setia Prameswari, P. (2023). Integrated photocatalysis-adsorption method for chromium wastewater treatment. *Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management*, *20*(February), 100810. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2023.100810>
- Waghmare, M. A., Beedri, N. I., Ubale, A. U., & Pathan, H. M. (2019). Fabrication and characterization of rose bengal sensitized binary TiO₂-ZrO₂ oxides photo-electrode based dye-sensitized solar cell. *Engineered Science*, *5*, 36–43. <https://doi.org/10.30919/es8d145>
- Yu, Y., Xia, J., Chen, C., Chen, H., Geng, J., & Li, H. (2020). One-step synthesis of a visible-light driven C@N-TiO₂ porous nanocomposite: Enhanced absorption, photocatalytic and photoelectrochemical performance. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, *136*(August 2019), 109169. <https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2019.109169>