

EFEKTIVITAS PENAMBAHAN rGO PADA KOMPOSIT TiO_2/rGO SEBAGAI PENDEGRADASI PEWARNA METHYLENE BLUE DALAM SINAR TAMPAK

¹Aprillia Sinda Dinningrum, ²Diah Hari Kusumawati

¹Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: aprilliasinda.21014@mhs.unesa.ac.id

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

Abstrak

Pencemaran lingkungan akibat pembuangan limbah berwarna seperti *methylene blue* menjadi perhatian serius karena sifatnya toksik, karsinogenik, dan sulit terurai. Fotokatalis berbasis semikonduktor seperti TiO_2 dikenal efektif untuk memecah senyawa kompleks menjadi senyawa yang lebih sederhana, namun memiliki keterbatasan dalam menyerap sinar tampak. Sehingga diperlukan modifikasi TiO_2 dengan material rGO yang bertujuan meningkatkan efisiensi degradasi di bawah sinar tampak. Penelitian ini bertujuan menganalisis efektivitas penambahan rGO pada komposit TiO_2/rGO sebagai pendegradasi pewarna *methylene blue* dalam sinar tampak. rGO direduksi dari GO yang disintesis menggunakan metode *Hummer's* termodifikasi dari arang kelapa, kemudian dikompositkan dengan TiO_2 menggunakan metode hidrotermal *autoclave* dengan variasi massa rGO 45, 60, 75, 90, dan 105 mg. Selanjutnya dikarakterisasi menggunakan SEM dan UV-Vis. Hasil SEM menunjukkan partikel TiO_2 menyelimuti lembaran rGO dengan distribusi partikel pada komposit TiO_2/rGO -105 sebesar 214,12 nm. Nilai *energy band gap* terkecil pada TiO_2/rGO -105 sebesar 2,26 eV. Efisiensi degradasi sebesar 99,8% pada menit ke-105. Hasil menunjukkan bahwa penambahan rGO dalam komposit TiO_2/rGO dapat meningkatkan efektivitas fotokatalis di bawah sinar tampak.

Kata Kunci: Fotokatalis, *Methylene Blue*, TiO_2 , GO, rGO, Hidrotermal Autoclave.

Abstract

Environmental pollution due to the disposal of colored waste such as *methylene blue* is a serious concern due to its toxic, carcinogenic, and difficult to decompose properties. Semiconductor-based photocatalysts such as TiO_2 are known to be effective in decomposing complex compounds into simpler compounds, but have limitations in absorbing visible light. Therefore, modification of TiO_2 with rGO material is needed to increase degradation efficiency under visible light. This study aims to analyze the effectiveness of adding rGO to TiO_2/rGO composites as a degrader of *methylene blue* dye in visible light. rGO was reduced from GO synthesized using the modified *Hummer's* method from coconut charcoal, then composited with TiO_2 using the autoclave hydrothermal method with variations in rGO mass of 45, 60, 75, 90, and 105 mg. Furthermore, it was characterized using SEM and UV-Vis. The SEM results showed that TiO_2 particles covered the rGO sheets with a particle distribution in the TiO_2/rGO -105 composite of 214.12 nm. The smallest energy band gap value in TiO_2/rGO -105 is 2.26 eV. The degradation efficiency is 99.8% at the 105th minute. The results show that the addition of rGO in the TiO_2/rGO composite can increase the effectiveness of the photocatalyst under visible light.

Keywords: Photocatalyst, *Methylene Blue*, TiO_2 , GO, rGO, Hydrothermal Autoclave.

I. PENDAHULUAN

Perkembangan industri telah menyebabkan pencemaran lingkungan, terutama akibat pembuangan limbah berwarna ke perairan. Pembuangan limbah ini dapat menimbulkan dampak buruk, termasuk efek toksik dan terhambatnya penetrasi cahaya ke dalam air, yang mengganggu keseimbangan ekosistem (Yanto Rahman & Sulistyowati, 2023). Salah satu jenis pewarna yang umum digunakan dalam dunia industri adalah *methylene blue* (Rahayu et al., 2022). *Methylene blue* merupakan senyawa organik kompleks yang sulit terurai. Pewarna sintesis ini dapat membentuk kompleks setelah terakumulasi, sehingga lebih tahan terhadap cahaya dan panas (Baunsele et al., 2024). Selama proses pewarnaan, sekitar 95% *methylene blue* dibuang ke perairan sebagai limbah (Pratama et al., 2021). Jika tidak diolah, zat ini menimbulkan ancaman serius bagi lingkungan. Berbagai metode, seperti klorinasi, biodegradasi, dan ozonasi, telah diterapkan untuk mengatasi masalah limbah ini. Namun, metode-metode ini seringkali mahal dan berpotensi karsinogenik, sehingga mengurangi efektivitasnya (Aritonang et al., 2023). Salah satu pendekatan yang lebih ramah lingkungan adalah fotokatalisis, yang menggunakan katalis berbasis semikonduktor dan paparan cahaya untuk mengubah senyawa kompleks menjadi senyawa yang lebih sederhana.

Keunggulan TiO_2 dibandingkan bahan semikonduktor lain, antara lain stabilitas kimia yang tinggi, ketahanan terhadap korosi, oksidasi, efisiensi fotokatalitik TiO_2 relatif tinggi, aman, tidak beracun, mudah didapat, dan memiliki stabilitas fisik yang baik. Namun, TiO_2 juga memiliki kelemahan, yaitu energi *band gap* yang cukup besar, sekitar 3,2 eV, konduktivitas yang rendah, dan laju rekombinasi elektron-hole yang tinggi, yang dapat menurunkan efisiensi fotokatalitik (Do et al., 2020). Oleh karena itu, modifikasi struktural TiO_2 diperlukan untuk mempersempit *band gap* dan menggeser penyerapan cahaya ke daerah tampak. Salah satu cara yang dapat diterapkan adalah memodifikasi TiO_2 menggunakan material berbasis karbon, seperti *reduced graphene oxide* (rGO). Hal ini terjadi karena *band gap* rGO lebih kecil dibandingkan dengan TiO_2 , sehingga diharapkan komposit TiO_2/rGO dapat memiliki *band gap* yang lebih rendah dan menggeser penyerapan cahaya ke daerah tampak. Selain itu, rGO memiliki konduktivitas listrik yang tinggi, yang dapat membantu mengurangi rekombinasi pasangan elektron-hole dan meningkatkan efisiensi fotokatalitik. Luas permukaan yang besar dan banyaknya gugus fungsi oksigen dalam rGO juga dapat meningkatkan adsorpsi molekul MB ke permukaan katalis, memungkinkan interaksi yang lebih efektif antara molekul polutan dan katalis, sehingga mempercepat proses degradasi MB. *Reduced graphene oxide* dapat diperoleh dari arang tempurung kelapa, yang kaya akan karbon dan memiliki struktur berpori, sehingga cocok untuk digunakan sebagai prekursor dalam sintesis *reduced graphene oxide* (Masriatini & Fatimura, 2019).

Komposit TiO_2/rGO telah terbukti efektif sebagai fotokatalis dalam proses degradasi pewarna MB. Penelitian Aritonang et al. (2023) menunjukkan bahwa TiO_2 memiliki nilai *energy band gap* sebesar 3,33 eV, sedangkan TiO_2/rGO mengalami penurunan *energy band gap* menjadi 3,23 eV dengan efisiensi degradasi mencapai 67,05% di bawah sinar tampak. Penelitian Hidayati et al. (2021) juga mencatat bahwa penambahan rGO pada komposit TiO_2/rGO menyebabkan penurunan *energy band gap* dari 3,29 eV menjadi 3,20 eV. Efisiensi degradasi MB oleh TiO_2/rGO mencapai 84,32% di bawah cahaya tampak, sedangkan TiO_2 hanya mampu mendegradasi sebesar 36,55%. Penelitian Garrafa-Gálvez et al. (2019) melaporkan bahwa efisiensi fotokatalis dalam mendegradasi MB menggunakan sinar matahari selama 60 menit mencapai 22% untuk TiO_2 dan 90% untuk komposit TiO_2/rGO dengan variasi penambahan rGO 45 mg. Berdasarkan uraian di atas, penelitian ini akan mengeksplorasi variasi konsentrasi rGO (45, 60, 75, 90, dan 105) mg. Penelitian ini juga menggunakan lampu xenon 200 watt sebagai sumber cahaya tampak. Dengan pendekatan ini, diharapkan komposit TiO_2/rGO dapat mendegradasi zat warna MB dalam waktu singkat dan proses degradasi dapat berlangsung optimal. Karakterisasi TiO_2/rGO sebagai pendegradasi zat warna MB di bawah cahaya tampak akan dianalisis *Scanning Electron Microscopy* (SEM), dan Spektrofotometer UV-Vis. Oleh karenanya peneliti menggunakan judul "Efektivitas Penambahan rGO Pada Komposit TiO_2/rGO Sebagai Pendegradasi Pewarna Methylene Blue Dalam Sinar Tampak".

II. METODE

A. Rancangan Penelitian

Penelitian dilakukan melalui tahap aktivasi karbon tempurung kelapa, tahap sintesis *graphene oxide* (GO), tahap sintesis *reduced graphene oxide* (rGO), dan tahap sintesis komposit TiO_2/rGO .

a. Tahap Aktivasi Arang Tempurung Kelapa

Proses aktivasi diawali dengan merendam material karbon ke dalam larutan aktivator kimia berupa NaOH 0,5 M selama 24 jam, dengan perbandingan massa karbon dan larutan aktivator sebesar 1:3 untuk memastikan proses impregnasi berlangsung optimal. Setelah tahap perendaman selesai, senyawa kompleks yang masih terkandung dalam arang, seperti belerang dan nitrogen, didekomposisi melalui proses kalsinasi menggunakan furnace pada suhu 500 °C selama 5 jam. Material hasil kalsinasi selanjutnya dicuci secara bertahap menggunakan larutan HCl 1 M dan air aquadest hingga mencapai kondisi pH netral, guna menghilangkan sisa aktivator dan pengotor. Tahap akhir dari rangkaian proses ini adalah pengeringan sampel di dalam oven pada suhu 110 °C selama 1 jam, sehingga diperoleh material karbon aktif yang siap digunakan (Putri & Supardi, 2023).

b. Tahap Sintesis Graphene Oxide (GO)

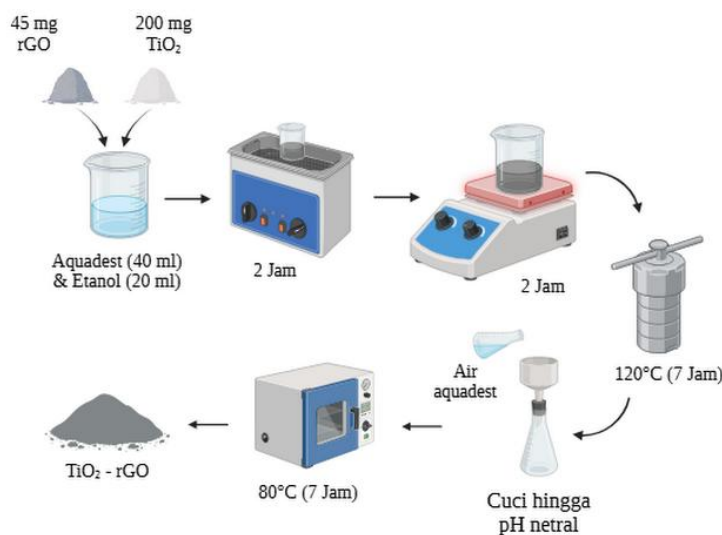
Proses sintesis GO menggunakan metode Hummer's termodifikasi dimulai dengan pencampuran 1 gram bubuk karbon aktif dan 0,5 gram NaNO_3 dalam 25 mL larutan H_2SO_4 , di stirrer selama 30 menit dalam kondisi *ice bath*. Kemudian secara perlahan menambahkan 3 gram KMnO_4 dan larutan diaduk menggunakan stirrer selama 3 jam dalam kondisi *ice bath* hingga warna berubah menjadi hijau tua. Larutan distirrer selama 30 menit pada suhu 40°C. 50 mL air aquadest ditambahkan dan stirrer selama 1 jam. Menambahkan kembali 100 mL air aquadest dan stirrer selama 1 jam. 5 mL H_2O_2 30% diteteskan perlahan untuk mengentikan proses oksidasi dan stirrer selama 45 menit. Penambahan H_2O_2 ditandai dengan munculnya gelembung yang menunjukkan adanya proses oksidasi dan menghilangkan sisa KMnO_4 . Larutan kemudian disentrifugasi untuk menghasilkan endapan dan dicuci hingga pH larutan mendekati netral. Hasil endapan tersebut kemudian dikeringkan menggunakan oven pada suhu 60°C selama 20 jam. Hasil akhir yang diperoleh yaitu serbuk *Graphene Oxide* (GO) (Putri & Supardi, 2023).

c. Tahap Sintesis Reduced Graphene Oxide (rGO)

Graphene oxide (GO) direduksi menjadi *reduced graphene oxide* (rGO) dimulai dengan mendispersikan GO dalam konsentrasi 2 mg/mL ke dalam 100 mL aquades. Sonikasi selama 1 jam untuk memastikan dispersi yang merata. Larutan hasil sonikasi direduksi dengan menambahkan 0,4 mL *hydrazine hydrate* ($\text{N}_2\text{H}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) dan diaduk menggunakan stirrer selama 2 jam pada suhu 95°C. Proses reduksi dilanjutkan dengan sentrifugasi larutan dan pencucian menggunakan aquades hingga diperoleh endapan rGO. Hasil endapan tersebut kemudian dikeringkan menggunakan oven pada suhu 50°C selama 24 jam hingga terbentuk serbuk *reduced graphene oxide* (rGO) (Rafitasari et al., 2016).

d. Tahap Sintesis Komposit TiO_2/rGO

Sintesis komposit TiO_2/rGO mengacu pada penelitian Hidayati et al. (2021). Proses dimulai dengan melarutkan 45 mg rGO dalam campuran 40 mL H_2O dan 20 mL etanol. Sonikasi selama 2 jam untuk memastikan dispersi yang homogen. Tahap berikutnya adalah penambahan 200 mg TiO_2 ke dalam larutan dan diaduk selama 2 jam agar tercampur secara merata. Larutan yang telah tercampur dipindahkan ke dalam *autoclave* tertutup dan dipanaskan pada suhu 120°C selama 7 jam untuk proses hidrotermal. Material hasil sintesis disaring dan dicuci menggunakan aquades beberapa kali hingga bersih dan mendekati pH netral. Tahap akhir dilakukan dengan pengeringan pada suhu 80°C selama 7 jam untuk memperoleh serbuk komposit TiO_2/rGO . Lakukan langkah yang sama dengan variasi penambahan massa rGO (60, 75, 90, 105) mg.



Gambar 1. Sintesis Komposit TiO₂/rGO

B. Variabel Operasional Penelitian

Variabel penelitian meliputi variabel manipulasi, variabel kontrol, dan variabel respon. Variabel manipulasi meliputi variasi massa rGO (45, 60, 75, 90, dan 105) mg dalam komposit TiO₂/rGO yang bertujuan untuk mengevaluasi sejauh mana penambahan rGO dapat meningkatkan efektivitas fotokatalis dalam proses degradasi zat pewarna. Variabel kontrol diterapkan, termasuk massa katalis 0,05 gram, durasi fotokatalis selama 2 jam dengan pengambilan sampel pada interval setiap 15 menit, serta jenis larutan uji yang digunakan, yaitu 100 ml larutan *methylene blue* 15 ppm. Dalam penelitian ini, variabel respon yang dianalisis mencakup hasil uji karakterisasi SEM dan spektroskopi UV-Vis.

C. Teknik Pengumpulan Data

Data diperoleh melalui karakterisasi menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) dan spektrofotometer UV-Vis. SEM digunakan untuk mengamati morfologi permukaan dan distribusi ukuran partikel. Spektroskopi UV-Vis digunakan untuk mengidentifikasi panjang gelombang maksimum, menghitung energi *band gap* melalui Tauc plot, serta mengukur absorbansi larutan metilen biru (MB) sebelum dan sesudah proses penyinaran. Aktivitas fotokatalis pada penelitian ini dilakukan menggunakan larutan *methylene blue* (MB) 15 ppm dengan irradiasi cahaya tampak menggunakan lampu Xenon 200 watt selama 120 menit. Interval waktu pengamatan yang digunakan yaitu setiap 15 menit. Katalis yang digunakan yaitu komposit TiO₂/rGO (45-105). Proses pengujian aktivitas fotokatalis yaitu dengan melarutkan 0,05 gram katalis pada larutan *methylene blue*. Larutan kemudian diaduk menggunakan *stirrer* dalam keadaan gelap selama 30 menit untuk mencapai kesetimbang absorpsi-desorpsi (Hunge et al., 2020). Selanjutnya, larutan diberi penyinaran sinar tampak dengan pengambilan sampel setiap interval 15 menit. Larutan yang diambil disentrifugasi untuk memisahkan endapan katalis. Absorbansi diukur pada panjang gelombang 664 nm.

D. Teknik Pengolahan Data

Citra SEM diolah menggunakan *software ImageJ* untuk menganalisis morfologi dan distribusi ukuran partikel. Sementara itu, data UV-Vis diolah menggunakan *software Origin* untuk menentukan panjang gelombang maksimum, menghitung nilai energi *band gap*, serta menghitung persentase degradasi MB menggunakan rumus:

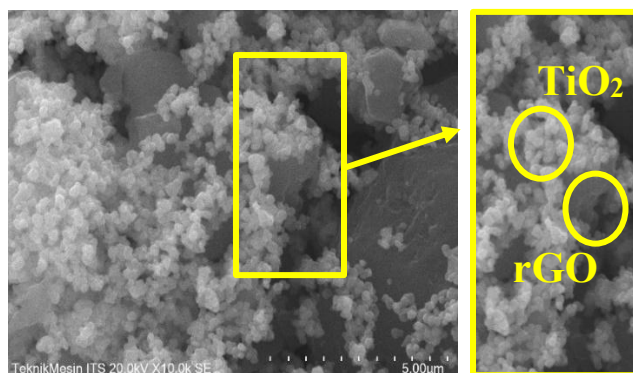
$$\%D = \frac{(A_0 - A_t)}{A_0} \times 100\% \quad (1)$$

Dimana A_0 adalah absorbansi awal larutan dan A_t adalah absorbansi pada saat menit ke- t (Aslam et al., 2023). Hasil degradasi disajikan dalam bentuk grafik waktu terhadap persentase degradasi.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

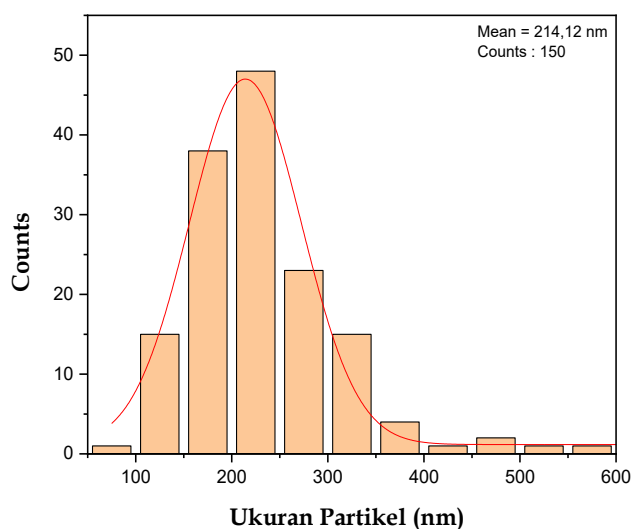
A. Hasil Karakterisasi Scanning Electron Microscopy (SEM)

Karakterisasi SEM bertujuan untuk menentukan morfologi permukaan sampel komposit TiO_2/rGO , distribusi partikel TiO_2 pada permukaan rGO, serta penyebaran partikel. **Gambar 2** menunjukkan morfologi komposit TiO_2/rGO -105 dengan perbesaran 10.000X. Morfologi yang diamati menunjukkan adanya lembaran tebal yang merepresentasikan rGO. Sementara itu, partikel-partikel berbentuk bulat yang menggumpal secara tidak teratur merepresentasikan TiO_2 . Terlihat bahwa partikel TiO_2 tersebar dan menempel pada permukaan maupun tepi lembaran rGO, menandakan terbentuknya interaksi antara kedua material tersebut dalam struktur komposit (Hikmah et al., 2024).



Gambar 2. Hasil Karakterisasi SEM

Ukuran partikel pada komposit TiO_2/rGO dianalisis menggunakan *software ImageJ* dengan cara mengukur area lembaran rGO yang tertutupi oleh partikel TiO_2 . Hasil pengukuran ini kemudian disajikan dalam bentuk histogram seperti ditampilkan pada **Gambar 3**. Berdasarkan histogram tersebut, rata-rata ukuran partikel dari komposit TiO_2/rGO diketahui sebesar 214,12 nm.

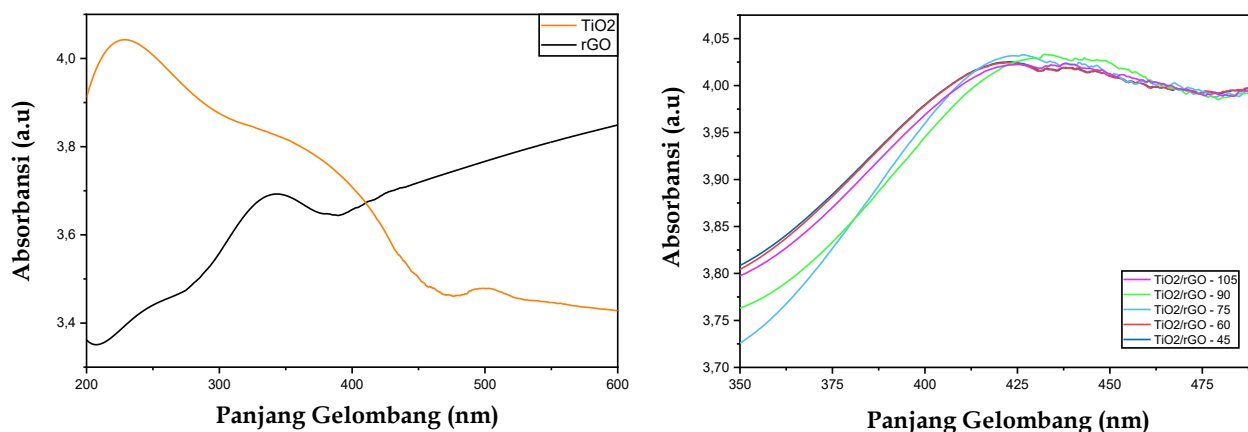


Gambar 3. Histogram Ukuran Distribusi Partikel

B. Hasil Karakterisasi UV-Vis

Karakterisasi UV-Vis dilakukan untuk mengidentifikasi kemampuan material dalam menyerap cahaya pada berbagai panjang gelombang. Pada **Gambar 4 a)** material TiO_2 dan rGO masing-masing menunjukkan karakteristik penyerapan cahaya yang terbatas pada wilayah ultraviolet (UV). TiO_2 memiliki puncak absorbansi yang cukup tajam pada kisaran 240 nm. Hal ini menunjukkan bahwa TiO_2 hanya aktif di wilayah UV dan belum mampu menyerap sinar tampak secara signifikan. Sifat ini sejalan dengan karakter semikonduktor TiO_2 fasa anatase yang memiliki band gap sekitar 3,2 eV, sehingga membatasi aktivitasnya hanya sampai panjang gelombang ~ 387 nm (Garrafa-Gálvez et al., 2019). Material rGO juga memiliki puncak

absorbansi pada sekitar 350 nm, yang berarti material ini masih aktif terutama di wilayah ultraviolet (UV) dan belum efektif dalam menyerap cahaya tampak (400–700 nm). Puncak serapan di sekitar 350 nm menandakan bahwa struktur sp^2 dari rGO belum sepenuhnya pulih, serta masih terdapat sejumlah gugus oksigen fungsional seperti epoksi, hidroksil, dan karbonil. Gugus ini memungkinkan transisi elektronik $\pi \rightarrow \pi^*$ dan $n \rightarrow \pi^*$ yang menyerap di wilayah UV (Baby et al., 2021).



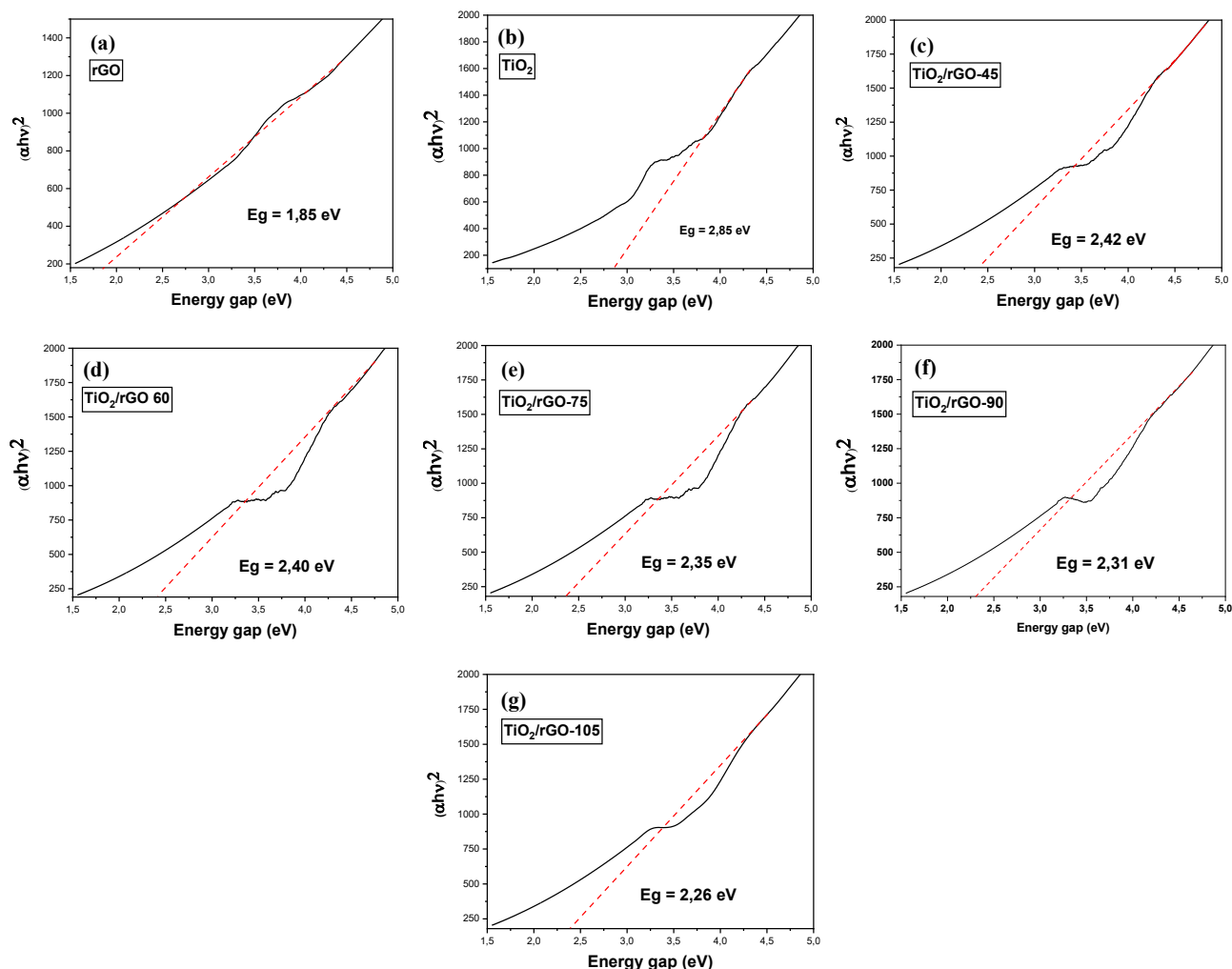
Gambar 4. Hasil Karakterisasi UV-Vis (a) TiO_2 dan rGO (b) Komposit TiO_2/rGO

Pada Gambar 4 b) terlihat bahwa spektrum UV-Vis dari seluruh komposit TiO_2/rGO menunjukkan puncak serapan pada panjang gelombang sekitar 420 nm, yang berada di wilayah sinar tampak. Peningkatan penyerapan cahaya pada komposit TiO_2/rGO disebabkan oleh kemampuan rGO dalam meningkatkan pemisahan muatan dan mobilitas elektron. Hal ini memungkinkan aktivitas fotokatalitik yang lebih efektif saat terpapar cahaya tampak (Ayala-Fonseca et al., 2020). Komposit TiO_2/rGO -75 menunjukkan absorbansi terendah pada 350 nm, mengindikasikan respons yang terbatas terhadap sinar UV. Sebaliknya, TiO_2/rGO -90 memperlihatkan peningkatan absorbansi yang signifikan di wilayah cahaya tampak, karena distribusi rGO yang lebih homogen pada permukaan TiO_2 sehingga meningkatkan penyerapan cahaya. Namun, pada rasio rGO yang berlebih, seperti TiO_2/rGO -105, terjadi aglomerasi rGO yang berpotensi mengurangi efektivitas interaksi cahaya dengan permukaan semikonduktor. Dari data panjang gelombang dan absorbansi dari uji UV-Vis dapat digunakan untuk menentukan energi *band gap* suatu material. Perhitungan energi *band gap* diperoleh menggunakan metode Tauc plot yang disajikan pada Gambar 5.

Energi *band gap* digunakan untuk mengukur energi minimum yang dibutuhkan untuk mengeksitasi elektron dari pita valensi (VB) ke pita konduksi (CB). Diketahui bahwa rGO (*reduced graphene oxide*) memiliki nilai *band gap* sebesar 1,85 eV yang tergolong dalam kategori semikonduktor dengan celah pita sempit. Karena masih adanya gugus fungsional oksigen, seperti hidroksil ($-\text{OH}$), epoksi ($-\text{O}-$), dan karboksil ($-\text{COOH}$) yang tertinggal pada permukaan graphene setelah proses reduksi, sehingga membuka *band gap* yang sebelumnya sempit dan bernilai hampir nol pada graphene murni (Jin et al., 2020). Sedangkan TiO_2 murni (anatase) mempunyai nilai *energy band gap* sebesar 2,85 eV. Nilai ini sedikit lebih rendah dibandingkan *energy gap* teoritis anatase ($\sim 3,2$ eV). Akan tetapi, *energy band gap* TiO_2 masih tergolong dalam rentang semikonduktor tipe *wide band gap* dan tergolong cukup besar untuk menempatkan TiO_2 sebagai semikonduktor aktif di bawah penyinaran ultraviolet (UV), sehingga belum efektif untuk menyerap sinar tampak.

Sedangkan pada komposit TiO_2/rGO terlihat bahwa penambahan rGO secara signifikan menurunkan nilai *energy gap* pada komposit. Komposit TiO_2/rGO (45,60,75,90,105) menunjukkan nilai *energy gap* sebesar 2,42 eV; 2,40 eV; 2,35 eV; 2,31 eV; 2,26 eV. Penurunan energi *band gap* pada komposit disebabkan karena terbentuknya ikatan titanium dengan karbon (Hunge et al., 2020). Ikatan ini menyebabkan jarak antara pita valensi dan pita konduksi menjadi lebih dekat, sehingga energi yang dibutuhkan untuk mengeksitasi elektron dari pita valensi ke pita konduksi menjadi lebih rendah, dan material tersebut dapat berfungsi di bawah cahaya tampak (Aritonang et al., 2023). Penurunan *energy band gap* ini disebabkan oleh penyempitan *band gap* yang memungkinkan material menyerap cahaya pada panjang gelombang yang lebih besar, termasuk cahaya

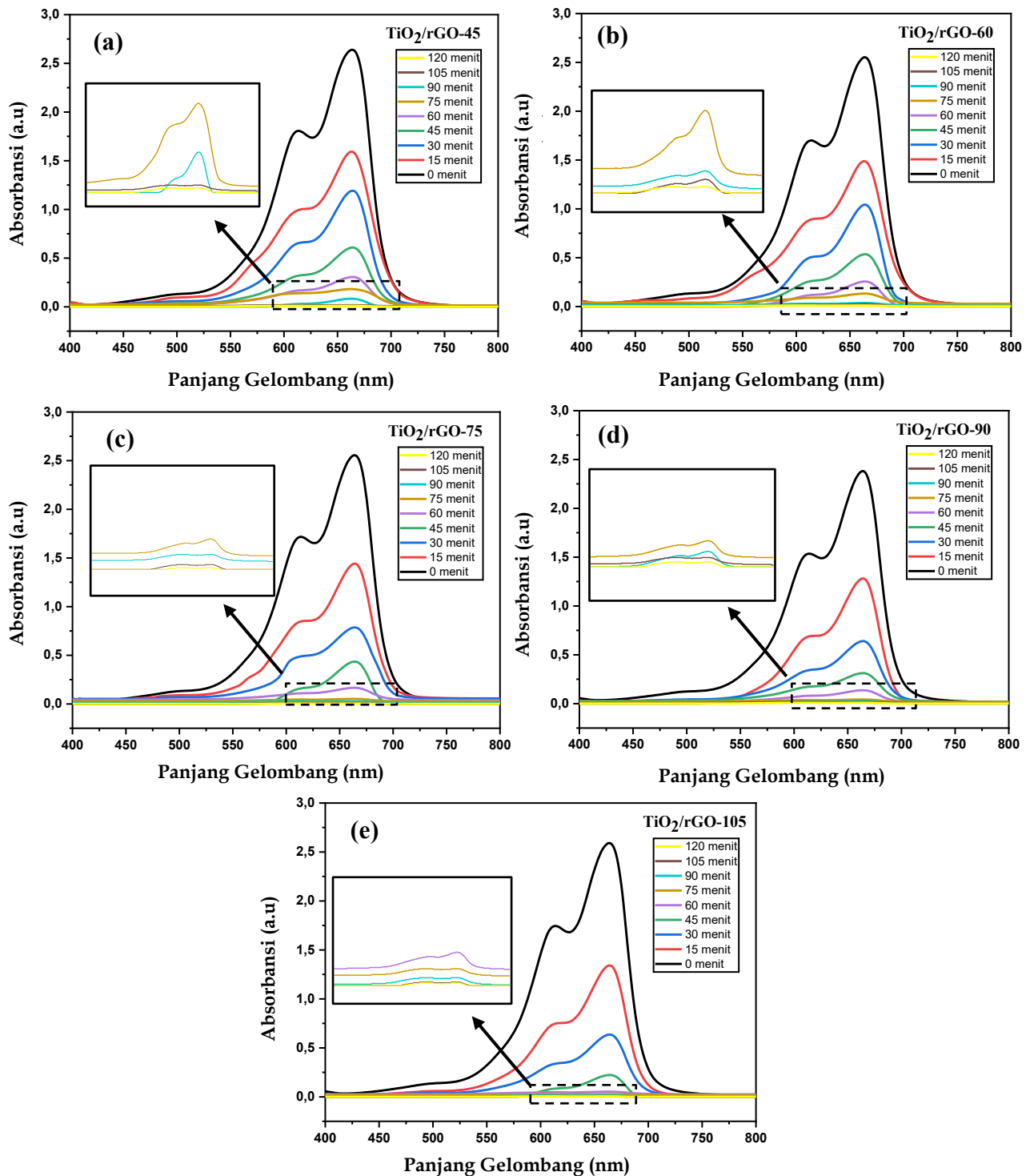
tampak. Penurunan *band gap* juga meningkatkan pemisahan pasangan elektron-hole, mengurangi rekombinasi, dan meningkatkan ketersediaan elektron bebas untuk reaksi kimia. Akibatnya, laju degradasi dalam proses fotokatalisis juga meningkat (Garrafa-Gálvez et al., 2019).



Gambar 4. Energy Band Gap (a) rGO (b) TiO_2 (c-g) TiO_2/rGO -45 – 105

C. Hasil Uji Aplikasi Fotokatalis

Hasil dari aktivitas fotokatalis kemudian diuji menggunakan karakterisasi UV-Vis untuk melihat hubungan antara panjang gelombang terhadap absorbansi, yang ditunjukkan pada **Gambar 5**. Melalui hasil UV-Vis, persentase degradasi selama aktivitas fotokatalis dapat dihitung melalui nilai absorbansi larutan *methylene blue* pada puncak serapan maksimum 664 nm menggunakan **Persamaan 1**, sehingga didapatkan data hasil aplikasi fotokatalis disajikan pada **Tabel 1**. Dari tabel terlihat bahwa penambahan rGO menyebabkan penurunan nilai absorbansi awal larutan. Dikarenakan rGO pada komposit dapat menyebabkan peningkatan luas permukaan dan jumlah situs aktif dalam proses fotokatalis, sehingga menyebabkan penurunan nilai absorbansi awal larutan (Xiong et al., 2025). Pada TiO_2/rGO -90, rasio rGO menghasilkan adsorpsi awal paling efektif, ditunjukkan oleh nilai absorbansi awal paling rendah. Hal ini menunjukkan lebih banyak *methylene blue* telah teradsorpsi sebelum proses fotokatalis berlangsung. Sedangkan rasio rGO yang terlalu rendah menghasilkan situs aktif yang terbatas dan rasio rGO yang terlalu tinggi dapat menyebabkan aglomerasi yang menyebabkan penurunan efisiensi adsorpsi awal (Kojican, Martina, 2021).



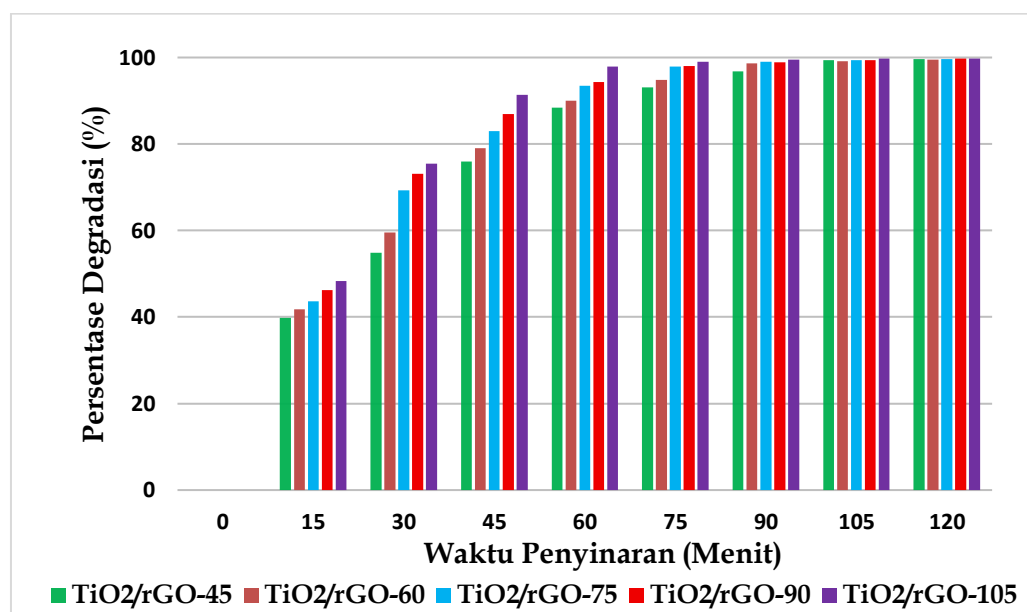
Gambar 5. Spektrum UV-Vis *Methylene Blue* Pada Komposit: (a) $\text{TiO}_2/\text{rGO-45}$ (b) $\text{TiO}_2/\text{rGO-60}$ (c) $\text{TiO}_2/\text{rGO-75}$ (d) $\text{TiO}_2/\text{rGO-90}$ (e) $\text{TiO}_2/\text{rGO-105}$

Berdasarkan tabel berikut diperoleh hubungan antara waktu penyinaran terhadap persentase degradasi yang disajikan pada **Gambar 6**. Terlihat bahwa seluruh variasi komposit TiO_2/rGO menunjukkan efektivitas fotokatalitik yang tinggi dengan peningkatan degradasi seiring bertambahnya waktu penyinaran di bawah sinar tampak. $\text{TiO}_2/\text{rGO-105}$ menunjukkan performa paling unggul, dengan laju degradasi tercepat dibanding variasi komposit lainnya. Sementara itu, komposit dengan kandungan rGO lebih rendah, seperti $\text{TiO}_2/\text{rGO-45}$ dan $\text{TiO}_2/\text{rGO-60}$, menunjukkan laju degradasi yang lebih lambat, kemungkinan karena jumlah

rGO belum cukup membentuk jaringan konduktif untuk mendukung transfer elektron. Pada menit ke-120, seluruh komposit TiO_2/rGO mencapai efisiensi degradasi di atas 99%.

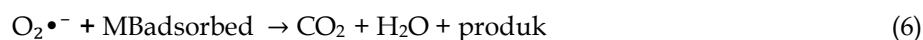
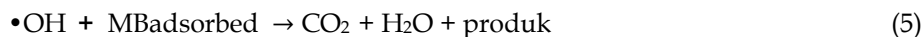
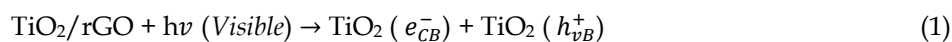
Tabel 1. Data Hasil Aplikasi Fotokatalisis Komposit TiO_2/rGO

Waktu Penyinaran (Menit)	$\text{TiO}_2/\text{rGO-45}$		$\text{TiO}_2/\text{rGO-60}$		$\text{TiO}_2/\text{rGO-75}$		$\text{TiO}_2/\text{rGO-90}$		$\text{TiO}_2/\text{rGO-105}$	
	Abs (a.u)	%D	Abs (a.u)	%D	Abs (a.u)	%D	Abs (a.u)	%D	Abs (a.u)	%D
0	2,639	0,00	2,552	0,00	2,554	0,00	2,379	0,00	2,590	0,00
15	1,589	39,79	1,485	41,81	1,440	43,62	1,280	46,20	1,340	48,26
30	1,191	54,87	1,031	59,60	0,785	69,26	0,639	73,14	0,635	75,48
45	0,635	75,94	0,534	79,08	0,434	83,01	0,312	86,89	0,223	91,39
60	0,306	88,41	0,256	89,97	0,166	93,50	0,136	94,28	0,053	97,95
75	0,182	93,10	0,132	94,83	0,052	97,96	0,046	98,07	0,027	98,96
90	0,086	96,74	0,036	98,59	0,026	98,98	0,026	98,91	0,013	99,50
105	0,016	99,39	0,023	99,10	0,017	99,33	0,016	99,33	0,006	99,77
120	0,010	99,62	0,011	99,57	0,008	99,69	0,005	99,79	0,005	99,81



Gambar 6. Hubungan Waktu Penyinaran Terhadap Persentase Degradasi Pada Komposit TiO_2/rGO

Dibawah sinar tampak, komposit TiO_2/rGO menunjukkan fotokatalitik yang lebih optimal dibandingkan TiO_2 murni. Hal ini disebabkan karena rGO berperan sebagai *fotosensitizer* sekaligus pemisah muatan. Ketika disinari cahaya tampak, energi foton dari cahaya tersebut mengeksitasi elektron dari pita valensi (VB) ke pita konduksi (CB) pada TiO_2 , sehingga terbentuk elektron (e^-) dan *hole* (h^+) (**reaksi 1**). Elektron yang tereksitasi ini akan ditransfer ke permukaan rGO (**reaksi 2**). rGO berfungsi sebagai penerima dan menyimpan elektron sehingga mengurangi rekombinasi elektron dan *hole*. Elektron yang ditransfer ke rGO akan bereaksi dengan oksigen (O_2) di dalam air, membentuk radikal superoksida ($\text{O}_2^{\bullet-}$) (**reaksi 3**). Sedangkan *hole* (h^+) di pita valensi (VB) TiO_2 akan mengoksidasi molekul air (H_2O) menjadi radikal hidroksil ($\bullet\text{OH}$) (**reaksi 4**). Dimana radikal superoksida ($\text{O}_2^{\bullet-}$) dan radikal hidroksil ($\bullet\text{OH}$) adalah spesies oksidatif yang sangat reaktif dan akan menghancurkan polutan seperti *methylene blue* (MB), mengubahnya menjadi senyawa sederhana seperti CO_2 dan H_2O (**reaksi 5&6**). Tahapan dalam mekanisme fotokatalitik dapat dijelaskan melalui persamaan berikut:



Keberadaan rGO tidak hanya memperluas penyerapan cahaya ke wilayah sinar tampak, tetapi juga mengurangi rekombinasi elektron-hole melalui mekanisme pemisahan muatan yang efisien. Selain itu, rGO dapat menghambat pertumbuhan kristal TiO₂ selama proses sintesis, sehingga menghasilkan ukuran kristal yang lebih kecil dan permukaan spesifik yang lebih luas yang membuat jarak difusi bagi pembawa muatan menjadi lebih pendek dan mempercepat transfer elektron. Sebagai material dengan konduktivitas yang sangat baik, rGO membuat perpindahan elektron menjadi lebih cepat, sehingga mengurangi rekombinasi elektron-hole. Interaksi antara rGO dan TiO₂ juga menyebabkan penyempitan *band gap*, sehingga energi yang dibutuhkan untuk mengeksitasi elektron mengalami penurunan. Akibatnya, penyerapan cahaya tampak menjadi lebih efektif, bahkan ditandai dengan pergeseran puncak absorbansi ke panjang gelombang sekitar 420 nm. Kondisi ini menunjukkan peningkatan aktivitas fotokatalitik di wilayah cahaya tampak (Ayala-Fonseca et al., 2020).

Sebaliknya, penggunaan material TiO₂ murni sebagai fotokatalis tanpa penambahan rGO, menunjukkan efisiensi degradasi jauh lebih rendah di bawah sinar tampak. Hal ini disebabkan oleh keterbatasan utama TiO₂ yang memiliki nilai *band gap* yang cukup besar, sekitar 2,85 eV, sehingga hanya mampu menyerap cahaya berenergi tinggi seperti sinar ultraviolet (UV) dengan panjang gelombang ~387 nm. Akibatnya, TiO₂ menjadi tidak aktif di bawah penyinaran sinar tampak dan membatasi efektivitasnya dalam aplikasi fotokatalis, mengingat sinar UV dari cahaya matahari hanya sekitar 5%–8% (Garrafa-Gálvez et al., 2019; Hidayati et al., 2021; A. Pratama et al., 2021).

IV. PENUTUP

A. Simpulan

Interaksi antara rGO dan TiO₂ menyebabkan penyempitan *band gap*, sehingga menurunkan energi yang dibutuhkan untuk eksitasi elektron. Kondisi ini mempercepat transfer elektron dari TiO₂ ke rGO dan menekan rekombinasi pasangan elektron-hole. Keberadaan rGO juga menggeser puncak absorbansi ke sekitar 420 nm, yang menandakan peningkatan aktivitas fotokatalitik di bawah cahaya tampak. Komposit TiO₂/rGO menunjukkan kinerja yang baik dalam mendegradasi *methylene blue* (MB), dengan nilai *band gap* berada pada rentang 2,26–2,42 eV dan efisiensi degradasi melebihi 99% setelah 120 menit penyinaran. Secara khusus, komposit TiO₂/rGO-105 memiliki ukuran partikel rata-rata 214,12 nm dengan *band gap* menyempit hingga 2,26 eV, serta mencapai efisiensi degradasi tertinggi sebesar 99,81% dalam 120 menit. Hasil ini menunjukkan bahwa komposit TiO₂/rGO berpotensi tinggi sebagai fotokatalis ramah lingkungan untuk aplikasi pengolahan limbah pewarna MB di bawah cahaya tampak.

B. Saran

Berdasarkan temuan dari penelitian yang telah dilakukan mengenai komposit TiO₂/rGO sebagai pendegradasi MB, terdapat beberapa rekomendasi yang dapat diajukan untuk pengembangan penelitian di masa depan. Pertama, penelitian dapat dilakukan terhadap jenis polutan atau pewarna lain dengan struktur molekul kompleks, yang akan memberikan gambaran lebih komprehensif mengenai kemampuan fotokatalis TiO₂/rGO di kehidupan sehari-hari. Kedua, penelitian dapat melihat pengaruh kondisi lain seperti pH larutan, lama penyinaran, dan konsentrasi zat warna terhadap kemampuan degradasi.

DAFTAR PUSTAKA

- Aritonang, A. B., Parwaty, P., Wibowo, M. A., Ardiningsih, P., & Adhitiyawarman, A. (2023). Sintesis TiO₂-rGO Dengan Pereduksi Alumunium untuk Fotokatalisis Degradasi Metilen Biru dibawah Irradiasi Sinar Tampak. *Equilibrium Journal of Chemical Engineering*, 6(2), 150. <https://doi.org/10.20961/equilibrium.v6i2.65518>
- Aslam, M. A., Zhang, L., Liu, X., Xu, Y., Li, N., Zhang, P., Ragab, A. H., Deifalla, A., & Khan, M. (2023). Thermal, mechanical, and photocatalytic dye degradation performances of the functionalized GO and TiO₂ decorated carbon foam composites. *Journal of Materials Research and Technology*, 26, 2830-2846. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.08.065>
- Ayala-Fonseca, L. A., Amieva, E. J. C., Rodriguez-Gonzalez, C., Angeles-Chavez, C., De la Rosa, E., Castaño, V. M., & Salas, P. (2020). Enhanced Raman Effect of Solvothermal Synthesized Reduced Graphene Oxide/Titanium Dioxide Nanocomposites. *ChemistrySelect*, 5(13), 3789-3797. <https://doi.org/10.1002/slct.202000335>
- Baby, A., Trovato, L., & Di Valentin, C. (2021). Single Atom Catalysts (SAC) trapped in defective and nitrogen-doped graphene supported on metal substrates. *Carbon*, 174, 772-788. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2020.12.045>
- Baunsele, A. B., Boelan, E. G., Kopon, A. M., Leba, M. A. U., Missa, H., Rahayu, R., Nitsae, M., & Siswanta, D. (2024). Kinetika Adsorpsi Metilen Biru Memanfaatkan Serbuk Gergaji Kayu Jati Teraktivasi Asam Sulfat. *Jurnal Inovasi Teknik Kimia*, 9(4), 284-294.
- Do, H. H., Nguyen, D. L. T., Nguyen, X. C., Le, T. H., Nguyen, T. P., Trinh, Q. T., Ahn, S. H., Vo, D. V. N., Kim, S. Y., & Le, Q. Van. (2020). Recent progress in TiO₂-based photocatalysts for hydrogen evolution reaction: A review. *Arabian Journal of Chemistry*, 13(2), 3653-3671. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2019.12.012>
- Garrafa-Gálvez, H. E., Alvarado-Beltrán, C. G., Almaral-Sánchez, J. L., Hurtado-Macías, A., Garzon-Fontecha, A. M., Luque, P. A., & Castro-Beltrán, A. (2019). Graphene role in improved solar photocatalytic performance of TiO₂-RGO nanocomposite. *Chemical Physics*, 521(September 2018), 35-43. <https://doi.org/10.1016/j.chemphys.2019.01.013>
- Hidayati, U. F., Aritonang, A. B., & Destiarti, L. (2021). TiO₂-rGO Composite for Photocatalytic Decolorization of Methylene Blue Under the Visible Light Illumination. *Berkala Sainstek*, 9(4), 167. <https://doi.org/10.19184/bst.v9i4.27602>
- Hikmah, U., Yanti, D. R., & Axala, D. L. G. (2024). Synthesis of Material Composite rGO-TiO₂ From Coconut Shells by Sol-Gel Methods as Photocatalyst. *Indonesian Journal of Applied Physics*, 14(1), 70. <https://doi.org/10.13057/ijap.v14i1.77714>
- Hunge, Y. M., Yadav, A. A., Dhodamani, A. G., Suzuki, N., Terashima, C., Fujishima, A., & Mathe, V. L. (2020). Enhanced Photocatalytic Performance Of Ultrasound Treated GO/TiO₂ Composite For Photocatalytic Degradation Of Salicylic Acid Under Sunlight Illumination. *Ultrasonics Sonochemistry*, 61(September 2019), 104849. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104849>
- Jin, Y., Zheng, Y., Podkolzin, S. G., & Lee, W. (2020). Band Gap Of Reduced Graphene Oxide Tuned By Controlling Functional Groups. *Journal of Materials Chemistry C*, 8(14), 4885-4894. <https://doi.org/10.1039/c9tc07063j>
- Kojican, Martina, et al. (2021). Nanocomposite for Organic Pollutant Degradation under Solar. *Catalysts*, 11, 1-16.
- Masriatini, R., & Fatimura, M. (2019). Penggunaan Arang Tempurung Kelapa Yang Diaktifkan Untuk Menyerap Zat Warna Limbah Cair Industri Kain Tradisional. *Jurnal Redoks*, 4, 37-40. <https://jurnal.univpgripalembang.ac.id/index.php/redoks/article/view/3508%0Ahttps://jurnal.univpgri-palembang.ac.id/index.php/redoks/article/download/3508/3253>
- Pratama, A., Destiarti, L., & Adhitiyawarman, A. (2021). Sintesis Titanium Oksida/Reduced Graphene Oxide (TiO₂/rGO) untuk Fotokatalisis Bahan Pewarna Metilen Biru. *Positron*, 11(1), 31. <https://doi.org/10.26418/positron.v11i1.45355>
- Putri, N. A., & Supardi, Z. A. I. (2023). Sintesis Dan Karakterisasi Graphene Oxide (Go) Dari Bahan Alam Tempurung Kelapa. *Inovasi Fisika Indonesia*, 12(2), 47-55. <https://doi.org/10.26740/ifi.v12n2.p47-55>
- Rafitasari, Y., Suhendar, H., Imani, N., Luciana, F., Radean, H., & Santoso, I. (2016). Sintesis Graphene Oxide Dan Reduced Graphene Oxide. V, SNF2016-MPS-95-SNF2016-MPS-98. <https://doi.org/10.21009/0305020218>
- Rahayu, N. A. I., Sylvia, N., Bahri, S., Meriatna, M., & Muarif, A. (2022). Adsorpsi Zat Warna Methylene Blue Menggunakan Adsorben Dari Ampas Teh Pada Kolom. *Chemical Engineering Journal Storage (CEJS)*, 2(2),

75. <https://doi.org/10.29103/cejs.v2i2.7030>

Xiong, N., Guo, Y., Nie, Y., Yao, Y., Ying, Z., Zhang, W., Liu, R., Wu, X., Zhou, H., Zhou, L., Wang, Y., He, J., & Yan, L. (2025). An Efficient Photocatalytic Material, rGO-TiO₂, That Can Be Industrially Produced: Fabrication and Structural Characterization. *Water (Switzerland)*, 17(2), 1–14. <https://doi.org/10.3390/w17020161>

Yanto Rahman, D., & Sulistyowati, R. (2023). Aplikasi Fotokatalis Tio₂ Dan Alternatifnya Untuk Degradasi Pewarna Sintetis Dalam Limbah Cair. *Environmental Science Journal (ESJo): Jurnal Ilmu Lingkungan*, 1(2), 89–105. <http://journal.univpgri-palembang.ac.id/index.php/esjo>