

Review: Komposit rGO-TiO₂ dalam Proses Fotokatalisis untuk Menghilangkan Kontaminan Warna pada Air

Lara Ismano Fitri, Desi Heltina*, Amun Amri

Program Studi Magister Teknik Kimia, Universitas Riau, Pekanbaru 28293, Indonesia

ARTICLE HISTORY

Received : 06-07-2024

Accepted : 26-10-2024

Published : 25-11-2024

KEYWORDS

rGO-TiO₂
fotokatalitik
hidrotermal
sol-gel
ultrasonikasi

*corresponding author:

Email: desi.heltina@lecturer.unri.ac.id



ABSTRACT

This article explains various synthesis methods for rGO-TiO₂ materials and their applications in colored wastewater treatment. The methods discussed include hydrothermal, sol-gel, ultrasonication, wet impregnation, electrospinning, and electrophoresis. Each method has its own advantages: the hydrothermal and sol-gel methods enhance photocatalytic activity through the integration of TiO₂ and rGO; ultrasonication and wet impregnation methods are effective in uniquely improving photocatalytic performance; while electrophoresis (EPD) and electrospinning methods excel in forming high-quality coatings and nanofibers that boost photocatalytic activity. The choice of method depends on the specific application and desired material properties. The hydrothermal and sol-gel methods are well-suited for photocatalytic applications, while EPD and electrospinning methods are superior for other applications, such as improving photovoltaic performance.

1. PENDAHULUAN

Dalam beberapa dekade terakhir, dunia telah menghadapi berbagai masalah lingkungan yang signifikan. Diantaranya adalah perubahan iklim yang dipicu oleh peningkatan gas rumah kaca, polusi udara yang diakibatkan oleh pembakaran terbuka, serta pencemaran air yang terjadi karena pembuangan limbah industri tanpa pengolahan yang memadai (Kaus et al., 2021). Kontaminan khususnya pada air dapat mencakup mikrobiologis, polutan kimia, logam berat, pestisida, obat-obatan, dan kontaminan baru. Sumber air dapat tercemar oleh polutan kimia, termasuk bahan kimia rumah tangga, limpasan pertanian, dan limbah industri, yang berbahaya bagi kesehatan manusia (Babuji et al., 2023).

Berbagai jenis polutan tersebar luas dan dapat masuk ke lingkungan melalui berbagai jalur. Dalam studi ini, limbah pewarna dipilih sebagai contoh polutan lingkungan terkhusus air yang kompleks, untuk didekomposisi dari media air karena sering ditemukan di lingkungan. Limbah pewarna ini sering digunakan dalam produksi industri, seperti untuk pewarnaan tekstil, kulit, kertas, dan plastik (Kocijan et al., 2021). Pewarna residu yang memiliki sifat beracun dan karsinogenik, serta dampak metabolitnya yang signifikan terhadap ekosistem, merupakan polutan organik serta berpotensi menimbulkan bahaya serius bagi kehidupan organisme, terutama bila terakumulasi dalam rantai makanan (Luna-Sanguino et al., 2019). Limbah buangan tersebut apabila tidak diolah terlebih dahulu akan sangat berbahaya bagi lingkungan dan ekosistem terutama air dan secara langsung akan berdampak pada ketersediaan air bersih (UN, 2017). Menurut Kumari et al., (2023) limbah tekstil memiliki ciri khas warna yang kuat walaupun konsentrasinya belum tinggi, menghalangi masuknya cahaya ke dalam air, beracun dan karsinogenik bila dikonsumsi.

Peraturan Pemerintah Republik Indonesia No. 82 tahun 2001 mengatur bahwa limbah industri harus diolah hingga tidak mengandung warna (max: 15 mg/L), *sludge*, dan zat berbahaya (Nikmah., 2019). Maka diperlukan proses pengolahan yang tepat untuk menghilangkan pewarna dan produk degradasinya dari air limbah industri sebelum dibuang ke lingkungan (Kiwaan et al., 2020). Berbagai metode pemurnian air telah diusulkan dan diterapkan untuk mengatasi masalah ini, seperti metode pertukaran ion, adsorpsi, teknik pemisahan dengan membran, elektrokimia, fotokatalisis dan lain-lain (Li et al., 2021). Proses fotokatalis dipilih sebagai metode alternatif untuk pengolahan air limbah organik karena memiliki beberapa keunggulan seperti ramah lingkungan, mudah diaplikasikan karena menggunakan sinar matahari untuk mengaktifkan katalis, biaya rendah, tidak menghasilkan endapan berbahaya, dan mampu mengubah polutan menjadi CO₂ dan H₂O (Al-Nuaim et al., 2023).

Dalam proses fotokatalis, beberapa material yang umumnya digunakan diantaranya TiO₂, ZnO, Fe₂O₃, CdS, GaP, ZnS, dan WO₃, dari berbagai macam material semikonduktor, TiO₂ dipilih dikarenakan dapat menjanjikan untuk mitigasi berbagai polutan beracun, stabilitas kimia yang tinggi, tahan terhadap korosi, oksidasi, dan degradasi oleh zat kimia agresif, efisiensi fotokatalisis yang tinggi, aman, ketersediaan sumber daya yang melimpah, berbiaya rendah, mudah diproduksi dan stabilitas fisik yang baik (Alam et al., 2018). Namun, ada beberapa kelemahan dalam penggunaan oksida logam untuk degradasi fotokatalitik, seperti celah pita yang lebar, yang secara signifikan membatasi aktivitas fotokatalitiknya (Wang et al., 2019). Selain itu, ada faktor lain yang mempengaruhi fotodegradasi yaitu rekombinasi elektron dan *hole* yang cepat (Liu et al., 2019). Baru-baru ini, untuk meningkatkan kemampuan fotodegradasi fotokatalis TiO₂, telah dilakukan penggabungan dengan semikonduktor lain, *doping* dengan ion logam, dan pengkompositan partikel TiO₂ pada material yang memiliki permukaan yang luas seperti zeolit, karbon, atau material mesopori (Deshmukh et al., 2020). Dengan demikian, salah satu cara untuk mengatasi keterbatasan TiO₂ adalah dengan menggabungkan fotokatalis nanokomposit TiO₂ dengan material karbon seperti graphene, secara signifikan akan meningkatkan perpindahan elektron yang terbentuk selama aktivasi dengan adanya cahaya dan menekan rekombinasi elektron dan *hole* (Barai et al., 2019). Graphene memiliki mobilitas pembawa muatan listrik yang sangat tinggi, serta luas permukaan yang besar. Sifat fotonik dan elektronik ini menjadikannya material yang ideal untuk meningkatkan fotoreaktivitas TiO₂ (Deshmukh et al., 2020). Untuk meningkatkan aktivitas katalitik dari graphene diperlukan modifikasi permukaan seperti doping dengan heteroatom dan reduksi kimia atau termal menjadi *reduced graphene oxide* (rGO) (Oh and Lim., 2019).

Tujuan penulisan artikel *review* ini adalah mengkaji perkembangan terkini dalam pembuatan dan aplikasi komposit rGO-TiO₂ untuk degradasi kontaminan warna dalam air melalui proses fotokatalisis dan memberikan pemahaman menyeluruh tentang efisiensi komposit rGO-TiO₂ dalam proses fotokatalisis untuk menghilangkan kontaminan dari air. Artikel *review* ini akan menggambarkan prinsip kerja fotokatalisis, mekanisme reaksi yang terlibat, dan karakteristik komposit rGO-TiO₂ sebagai katalis. Artikel *review* ini akan membahas berbagai studi kasus yang menunjukkan efektivitas dan penggunaan komposit rGO-TiO₂ dalam menghilangkan berbagai polutan dari air seperti pewarna.

2. METODE

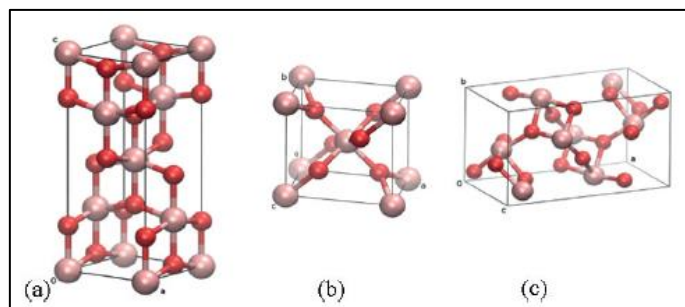
Metode penelitian dalam artikel ini mencakup proses pencarian dan analisis yang cermat terhadap berbagai studi terdahulu yang relevan. Langkah pertama melibatkan pencarian literatur yang komprehensif melalui basis data akademik dan jurnal ilmiah, dengan tujuan mengidentifikasi penelitian-penelitian yang telah dilakukan terkait penggunaan fotokatalis komposit rGO-TiO₂ serta alternatifnya dalam degradasi pewarna sintesis pada limbah cair. Proses ini dilakukan secara teliti untuk memastikan bahwa semua sumber yang relevan teridentifikasi. Analisis ini bertujuan untuk mengekstrak informasi yang rinci dan komprehensif mengenai metode penggunaan fotokatalis komposit rGO-TiO₂. Dalam proses ini, berbagai aspek dari setiap studi, termasuk metodologi, hasil, dan kesimpulan dievaluasi dengan seksama untuk mendapatkan gambaran yang lengkap dan mendalam. Informasi yang berhasil dikumpulkan kemudian disusun dan disintesis menjadi bagian-bagian yang saling terkait, sehingga membentuk struktur artikel yang koheren dan terorganisir dengan baik. Proses sintesis ini tidak hanya berfokus pada menggabungkan informasi, tetapi juga pada mengidentifikasi pola dan tema umum yang muncul dari berbagai studi yang dianalisis. Dengan demikian, artikel ini dapat memberikan gambaran yang lebih holistik dan mendalam mengenai penggunaan fotokatalis komposit rGO-TiO₂ dalam degradasi pewarna sintesis. Selain itu, informasi yang disintesis ini digunakan sebagai fondasi yang kuat untuk menulis artikel review yang komprehensif dan informatif. Artikel review ini diharapkan dapat memberikan wawasan yang jelas dan mendalam kepada pembaca mengenai topik yang dibahas, serta menawarkan perspektif yang lebih luas tentang potensi dan tantangan dalam penggunaan fotokatalis komposit rGO-TiO₂. Dengan demikian, artikel ini tidak hanya berfungsi sebagai sumber informasi, tetapi juga diharapkan sebagai referensi yang berharga bagi peneliti dan praktisi di bidang yang terkait.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada artikel review ini, dilakukan analisis data berbagai metode sintesis material komposit rGO-TiO₂ dan pengaplikasiannya pada polutan terkhusus terhadap limbah warna. Peningkatan aktivitas fotokatalitik TiO₂-rGO dapat diatribusikan pada peningkatan signifikan transfer elektron antar muka, yang krusial dalam reaksi fotokatalitik (Yu, et al., 2018). Menurut literatur ada beberapa strategi, seperti hidrotermal, sol-gel, ultrasonikasi, impregnasi basah, elektrospinning dan elektroforesis, dapat digunakan untuk mengintegrasikan rGO ke dalam fotokatalis semikonduktor (Kaus et al., 2021).

Titanium Dioksida (TiO₂)

Titanium dioksida (TiO₂) nanopartikel merupakan bahan yang menarik dengan sifat yang diinginkan dari stabilitas kimia, tidak beracun, foto reaktivitas tinggi, ketahanan korosi, dan ekonomis (Kim, et al., 2021)

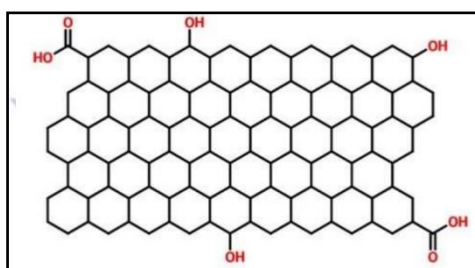


Gambar 1. Struktur *rutile*, *anatase*, dan *brookite* (Scarpelli et al., 2018)

TiO₂ secara alami terjadi dalam tiga fase kristal yang berbeda dengan sifat fisik dan kimia: *rutile* (a), *anatase* (b), *brookite* (a) (Kim, et al., 2021). Secara umum, aktivitas fotokatalitik TiO₂ dipengaruhi oleh struktur fasa, ukuran kristal, luas permukaan spesifik, dan struktur pori. Meskipun fasa rutil memiliki celah pita yang lebih kecil (3,0 eV) daripada anatase (3,2 eV), aktivitas fotokatalitiknya lebih rendah dari anatase karena rutil menunjukkan tingkat rekombinasi elektron (e⁻) dan hole (h⁺) yang lebih cepat, ukuran butir yang lebih besar, dan luas permukaan spesifik yang lebih kecil. Masa pakai elektron dan *hole* yang dihasilkan pada penyerapan foton lebih lama untuk *anatase* daripada *rutile*, sehingga meningkatkan performa fotoeksitasi dalam *anatase*. Meskipun *anatase* memiliki beberapa keunggulan sebagai fotokatalis, kinerjanya dibatasi oleh laju rekombinasi e⁻/h⁺ yang cepat. Beberapa peneliti telah menunjukkan bahwa campuran fasa TiO₂ menunjukkan kinerja fotokatalitik yang jauh lebih tinggi daripada TiO₂ fase tunggal. Penjajaran pita yang berbeda dari fase TiO₂ campuran dapat memfasilitasi transfer muatan pada antarmuka. Hal ini meningkatkan pemisahan e⁻/h⁺ dan mengurangi rekombinasi e⁻/h⁺ (Hamed, 2019).

Reduced Graphene Oxide (rGO)

Reduced Graphene Oxide (rGO) merupakan material baru yang terbentuk dari satu lapis atom karbon yang memiliki struktur heksagonal menyerupai sarang lebah. Unit dasar struktur ini hanya terdiri atas enam karbon yang saling bergabung secara kimiawi. Jarak antar atom C-nya sama dengan 0,142 nm (Manalu, 2022).

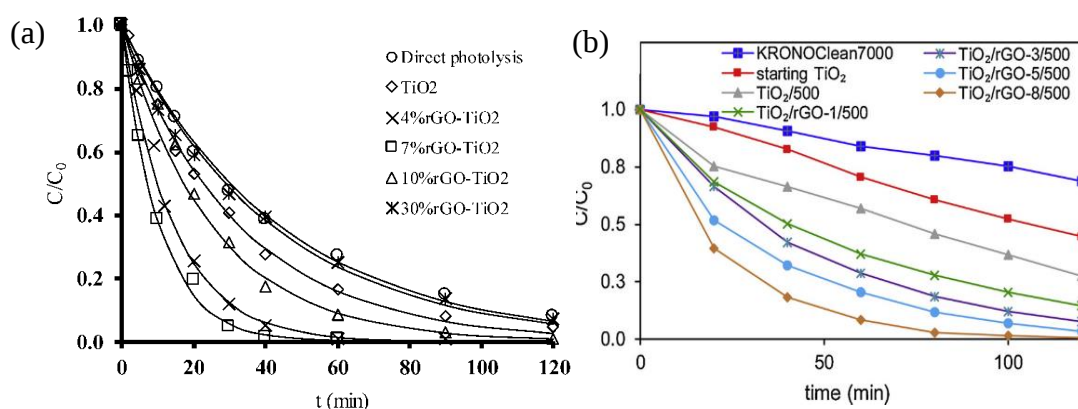


Gambar 2. Struktur rGO (Safitri and Kusumawati, 2020)

Secara sederhana *graphite* dioksidasi menjadi *graphite oxide*, kemudian lembaran-lembaran *graphite oxide* tersebut dikelupas (*exfoliated*) dalam air hingga terbentuk *graphene oxide*. Graphene tereduksi didapatkan dengan mereduksi *graphene oxide* menggunakan agen pereduksi, seperti adalah asam sitrat atau asam askorbat (Manalu, 2022).

Metode Hidrotermal

Proses sintesis nanomaterial dan integrasinya dengan rGO secara ekstensif telah banyak dilakukan menggunakan metode hidrotermal, seperti yang sudah dilakukan oleh Aritonang et al., (2023). Metode hidrotermal melibatkan reaksi di bawah suhu dan atau tekanan yang terkontrol, dan biasanya dilakukan dalam autoklaf *stainless steel*. Setiap material memiliki suhu dan tekanan internal yang berbeda untuk menjaga keberlangsungan proses. Wadah tersebut kemudian dimasukkan ke dalam autoklaf baja tahan karat sebagai komponen luar tanpa ruang di antaranya. Metode hidrotermal yang mengintegrasikan nanomaterial semikonduktor TiO_2 dengan rGO telah dilaporkan dalam banyak penelitian, seperti rGO/ TiO_2 (Tolosana-Moranchel et al., 2019). Menurut Kaus et al., (2021), metode hidrotermal memiliki keunggulan meliputi lingkungan operasi yang moderat dengan suhu di bawah 300°C , ramah lingkungan, biaya yang rendah, dan dispersi yang baik dalam satu langkah prosedur. Penggunaan metode hidrotermal telah dilakukan oleh Kusiak-Nejman et al., (2020), langkah-langkah sintesis menggunakan pelarut *isopropanol* dipanaskan pada suhu 180°C selama 4 jam, hasil penelitian menunjukkan hibridisasi positif antara semikonduktor dengan rGO menghasilkan peningkatan aktivitas fotokatalitik semikonduktor, terutama dalam pengolahan air limbah, tanpa memandang jenis kontaminan dan semikonduktor yang digunakan. Penelitian dengan metode yang sama juga dilakukan oleh Ruid et al., (2020), mereka menemukan bahwa material TiO_2 yang dikompositkan dengan rGO dengan metode hidrotermal lebih baik fotokatalitiknya dibanding TiO_2 murni, hal itu juga dipengaruhi oleh massa rGO pada komposit



Gambar 3. Hasil Fotodegradasi metilen biru metode hidrotermal (a). TiO_2 , rGO- TiO_2 berbagai massa (Ruid et al., 2020). (b). TiO_2 , rGO- TiO_2 berbagai massa (Kusiak-Nejman et al., 2020)

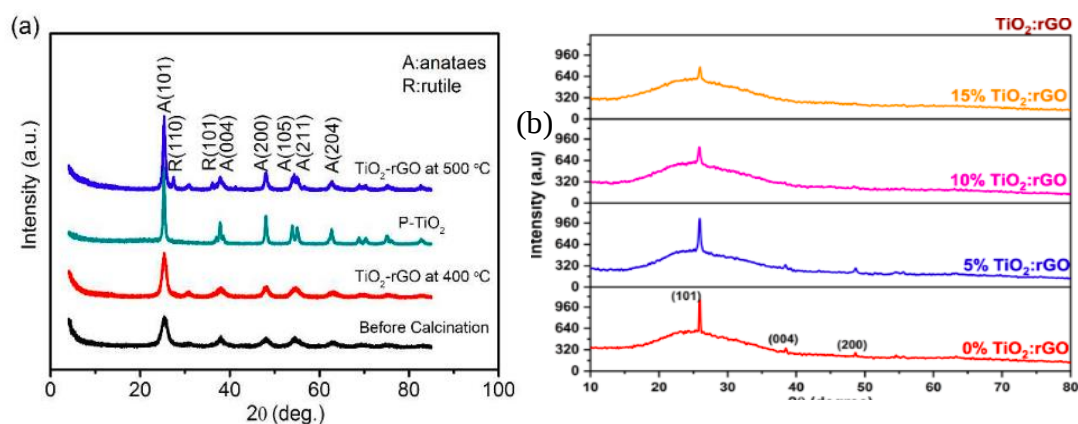
Terlihat pada gambar, komposit rGO- TiO_2 telah disintesis dengan metode hidrotermal dan diuji aktifitas fotokatalitiknya dengan melihat pengaruh dari massa rGO, dapat dilihat bahwa penambahan rGO ataupun suhu kalsinasi memiliki pengaruh. dimana jika kandungan rGO makin besar akan menyebabkan agregasi pada material komposit sehingga mengurangi kapasitas penyerapan cahaya (Ruid et al., 2020). Hal yang sama juga ditemukan oleh Wafi et al., (2022), Alkharabsheh et al., (2024) di dalam penelitiannya. Menurut Aritonang et al., (2023), TiO_2 memiliki nilai celah pita sebesar 3,33 eV dan fotokatalis TiO_2 -rGO sebesar 3,23 eV yang menunjukkan terjadinya penurunan celah pita TiO_2 setelah dikompositkan dengan rGO. Sedangkan Kusiak-Nejman et al., (2020) menemukan bahwa sampel TiO_2 yang

dimodifikasi dengan rGO dengan metode hidrotermal menunjukkan peningkatan signifikan dalam penghilangan metilen biru dibandingkan sampel tanpa rGO. Metode hidrotermal memainkan peran kunci dalam sintesis dan pengoptimalan sifat-sifat fotokatalitik dari komposit rGO-TiO₂, yang berdampak pada efisiensi degradasi zat pencemar seperti metilen biru.

Metode Sol-Gel

Metode yang paling banyak digunakan untuk membuat komposit TiO₂-rGO adalah sol-gel (Rahmawati & Kusumawati, 2020). Sol-gel dapat didefinisikan sebagai metode yang mensuspensikan partikel-padat dalam pelarut yang membentuk sol, proses dimulai dengan pemanasan pada suhu tinggi, biasanya untuk menghasilkan produk akhir dalam bentuk bubuk melalui kalsinasi. Proses sol-gel memungkinkan pengaturan luas permukaan, distribusi ukuran pori, stabilitas tekstur, homogenitas, serta sifat struktural yang dapat mempengaruhi kemurnian katalis dan komposisi produk (Kaus et al., 2021).

Penggunaan metode sol-gel telah dilakukan oleh Ayala et al., (2024), dengan menggunakan TBT sebagai precursor. TBT dilarutkan dalam etanol selama 15 menit dengan diaduk secara konstan. Kemudian, air suling ditambahkan sedikit demi sedikit, dengan perbandingan TBT: etanol: air sebesar 1:20,2:1,5. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode sol-gel lebih baik dari pada solvothermal dilihat dari karakteristik material yang lebih baik pada metode sol-gel, seperti band gap yang rendah (2,45 eV). Penelitian dengan metode yang sama juga dilakukan oleh Helmy et al., (2018), pada penelitian ini, nanopartikel TiO₂, C-TiO₂, S-TiO₂, dan C,S-TiO₂ disintesis melalui proses sol-gel dan digunakan sebagai fotokatalis untuk degradasi fotokatalitik pewarna RB-19 dan RR-76 dalam air limbah industri. Efisiensi degradasi fotokatalitik mencapai 100% setelah 1 jam iradiasi di bawah cahaya tampak dengan dosis fotokatalitik 1,6 g/L. Penelitian dengan metode yang sama juga dilaporkan oleh Akyüz (2021), menemukan bahwa nanokomposit rGO-TiO₂-CdO-ZnO-Ag yang disintesis menggunakan metode sol-gel menunjukkan efisiensi degradasi mencapai 91% dan laju degradasi yang cepat, yaitu hanya dalam waktu 15 menit. Penurunan energi celah pita TiO₂ yang luas dengan kehadiran oksida logam lainnya, serta peningkatan dalam pemisahan muatan dan stabilitas berkat rGO dan nanopartikel Ag.

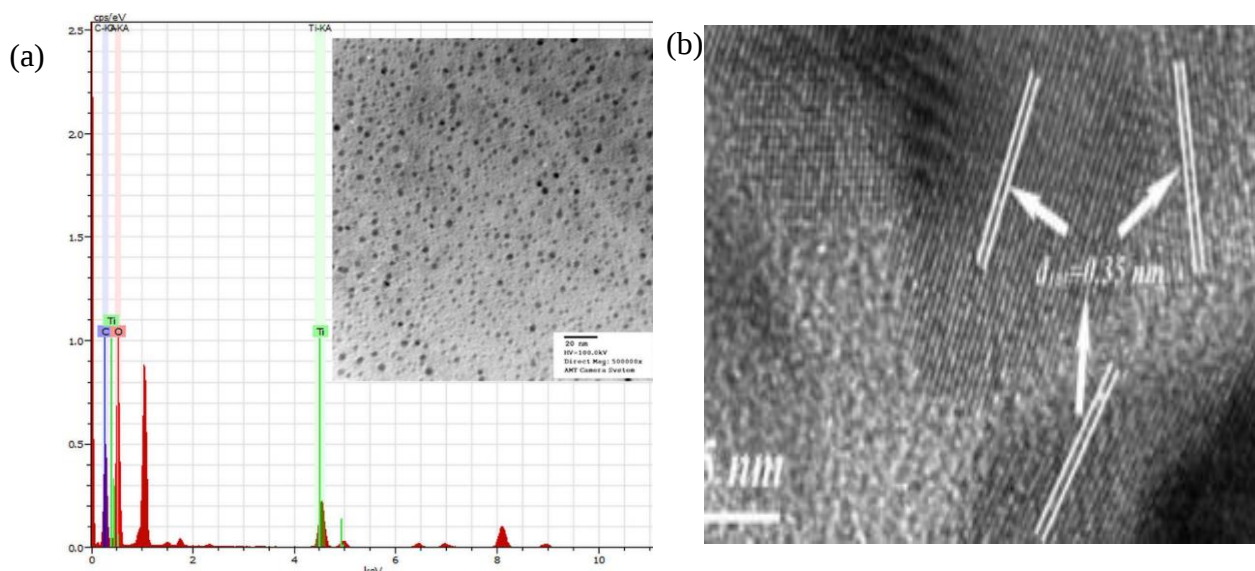


Gambar 4. a). Hasil XRD metode sol-gel rGO-TiO₂ (Zhang et al., 2017). (b). rGO-TiO₂ (Joshi et al., 2024).

Berdasarkan Gambar 4 dapat dilihat kedua penelitian menunjukkan bahwa metode sol-gel efektif dalam menghasilkan fase anatase TiO_2 , namun faktor perlakuan yang berbeda (suhu kalsinasi (a) vs. persentase TiO_2 (b)) memiliki efek yang signifikan terhadap struktur kristal dan intensitas puncak difraksi.

Metode Ultrasonikasi

Metode ultrasonikasi menggunakan gelombang suara ultrasonik dengan frekuensi tinggi untuk menghasilkan getaran mekanis dalam cairan atau suspensi, memanfaatkan fenomena kavitasi untuk berbagai aplikasi seperti pencampuran, dispersi partikel, dan memfasilitasi reaksi kimia (Alizadeh et al., 2019). Penggunaan metode ini telah dilakukan di beberapa penelitian sebelumnya, seperti yang dilakukan oleh Deshmukh et al., (2020) dalam mensintesis komposit rGO- TiO_2 , metode tersebut dilakukan selama 30 menit dengan iso-proanol, degradasi maksimum metilen biru mencapai 91,3% dalam waktu 30 menit.



Gambar 5. Hasil analisis TEM metode ultrasonikasi (a) rGO- TiO_2 (Deshmukh et al., 2020) (b) rGO- TiO_2 (Hou et al., 2019)

Berdasarkan Gambar 5, analisis EDAX menunjukkan keberadaan unsur utama C, Ti, dan O dalam komposisi yang sesuai. Gambar TEM menunjukkan struktur permukaan yang halus dan struktur 2D dari lembaran rGO, memvalidasi pencapaian beban nanopartikel TiO_2 yang efisien. Teknologi ultrasonik memberikan lingkungan reaksi ekstrem yang memfasilitasi beban nanopartikel dengan ukuran yang lebih kecil, meningkatkan kinerja fotokatalitik nanokomposit (Deshmukh et al., 2020), menurut Hou et al., (2019), Ultrasonikasi membantu mendispersikan partikel dengan efektif dalam larutan. Dalam hal ini, TiO_2 dan rGO dapat didispersikan dengan baik tanpa aglomerasi (penggumpalan) yang bisa merusak struktur kristal.

Metode Impregnasi Basah

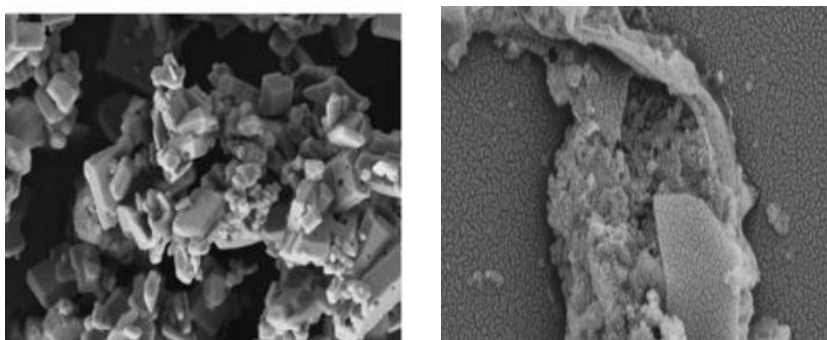
Menurut Deraz (2018), metode impregnasi basah, atau yang juga dikenal sebagai impregnasi kelembaban awal, adalah teknik yang digunakan dalam sintesis katalis heterogen untuk memuatkan atau menginkorporasi senyawa atau partikel katalitik ke dalam suatu bahan pendukung (support material). Prosesnya melibatkan perendaman bahan pendukung dalam

larutan prekursor katalis untuk jangka waktu tertentu sehingga larutan prekursor dapat meresap ke dalam pori-pori atau permukaan bahan pendukung. Setelah perendaman, bahan pendukung dipisahkan dari larutan prekursor, kemudian dikeringkan untuk menghilangkan pelarut. Metode ini memungkinkan pengendalian yang baik terhadap beban katalis di permukaan atau dalam pori-pori bahan pendukung, sehingga sering digunakan dalam preparasi katalis nanomaterial atau material semikonduktor pada substrat seperti *reduced graphene oxide* (rGO). Penelitian dengan metode ini sudah dilakukan oleh peneliti sebelumnya, diantaranya Samsudin, Mahmood, dan Sufian pada tahun 2018, dari penelitian tersebut ditemukan bahwa penambahan 0,4% rGO pada fotokatalis $\text{TiO}_2/\text{BiVO}_4$ mengakibatkan penurunan luas permukaan BET (Tabel 3.1). Hal ini disebabkan oleh distribusi yang tidak merata dari lapisan rGO yang menghalangi struktur makroporus pada material tersebut. Menurut the at al., (2017), fenomena distribusi yang tidak merata pada rGO dapat dikurangi dengan menggunakan ultrasonikasi pada suspensi sebelum metode impregnasi basah, yang memungkinkan rGO tersebar secara merata.

Tabel 1. Hasil Karakterisasi BET rGO- $\text{TiO}_2/\text{BiVO}_4$ (Samsudin et al., 2018)

Katalis	BET (m^2g^{-1})
0% rGO- $\text{TiO}_2/\text{BiVO}_4$	3.35
0.4% rGO- $\text{TiO}_2/\text{BiVO}_4$	3.09
0.8% rGO- $\text{TiO}_2/\text{BiVO}_4$	3.42
1.0% rGO- $\text{TiO}_2/\text{BiVO}_4$	3.68
1.2% rGO- $\text{TiO}_2/\text{BiVO}_4$	3.67

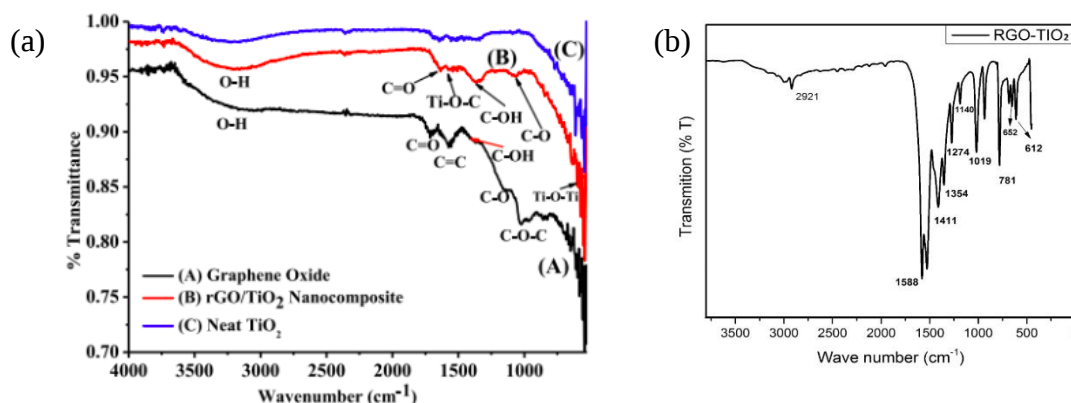
Metode impregnasi basah memiliki sifat dispersi yang kurang merata, dimana partikel cenderung aglomerasi, hal ini dapat dikonfirmasi melalui FESEM (Gambar 3.3a dan 3.3b) menurut penelitian yang dilakukan Samsudin et al., (2018) penurunan luas permukaan disebabkan oleh distribusi yang tidak merata dari lapisan rGO yang menghalangi struktur makroporus, hal ini juga dikonfirmasi oleh Tsai et al., (2024) melalui penelitian menggunakan material rGO/ $\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ dengan metode impregnasi basah dengan analisa FESEM.



Gambar 6. Hasil FESEM metode impregnasi basah (a) rGO- $\text{TiO}_2/\text{BiVO}_4$ (Samsudin et al., 2018) (b) rGO/ $\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ (Tsai et al., 2024)

Metode elektroforesis dan elektrosinning

Menurut Daryakenari et al., (2021), elektroforesis atau deposisi elektroforetik (EPD) adalah teknik serbaguna yang menarik perhatian karena kemudahan penggunaan dan kinerjanya dalam mendepositkan lapisan berkualitas tinggi pada suhu ruang. Prinsip teknik ini didasarkan pada deposisi partikel bermuatan dari suspensi koloid stabil pada substrat konduktif dengan menggunakan arus searah (DC) atau arus bolak-balik (AC). Aplikasi EPD sangat beragam karena teknik ini hanya memerlukan peralatan sederhana, biaya yang rendah, waktu pemrosesan yang singkat, dan mudah dimodifikasi untuk mengontrol bentuk dan ketebalan produk. Proses deposisi bisa dilakukan dengan fleksibel pada berbagai bentuk permukaan, baik silindris maupun datar (Kaus et al., 2021). Ada beberapa penelitian yang menggunakan metode ini, diantaranya Rahmat et al., (2019), mensintesis rGO-TiO₂ (TNWs) dengan metode elektroforesis, hasil penelitiannya menunjukkan bahwa lapisan rGO berhasil menutupi permukaan nanowire TiO₂ (NWs), berkat tarikan elektroforetik antara rGO yang bermuatan negatif dan elektroda positif. Proses ini meningkatkan interaksi antara rGO dan TiO₂, yang dapat meningkatkan kinerja fotokatalitik bahan tersebut. Penelitian dengan metode yang sama juga dilakukan oleh Purwaningsih et al., (2022), yang menemukan bahwa sebagian besar gugus fungsional mengandung oksigen telah dihilangkan dari GO melalui proses reduksi elektrokimia saat EPD, setelah waktu yang cukup setelah deposisi GO. Komposit hasil dari proses EPD terdiri dari *reduced graphene oxide* (rGO) dan γ -MnO₂, dan menunjukkan aktivitas elektrokatalitik yang sangat baik dalam mengurangi oksigen melalui mekanisme transfer dua elektron. Pendekatan ini membuka peluang untuk membuat komposit rGO dengan cara yang efisien dan efektif untuk aplikasi elektrokatalisis.



Gambar 7. Hasil analisis FTIR rGO-TiO₂ (a) Metode Elektrosinning (Prima et al., 2022) (b) Metode Elektroforesis (Noormohammadi and Sanjabi, 2020)

Salah satu metode lain yang dapat digunakan untuk membuat rGO-TiO₂ adalah elektrosinning, di mana metode ini akan menghasilkan nanofiber TiO₂ yang terintegrasi dengan rGO. Menurut penelitian Nasr et al., (2017), bahwa *nanosheets* rGO/nanofiber komposit TiO₂ yang disintesis menggunakan elektrosinning berhasil mengurangi band gap titanium dioksida dan rekombinasi pasangan elektron-hole yang dihasilkan oleh foton, sehingga meningkatkan aktivitas fotokatalitik di bawah cahaya tampak. Sedangkan metode elektroforesis terbukti sangat efektif dalam meningkatkan kinerja fotovoltaiik dengan

mengoptimalkan ketebalan lapisan rGO. Meskipun kedua metode ini melibatkan integrasi rGO dengan TiO₂, elektrospinning lebih fokus pada pembentukan nanofiber untuk aplikasi fotokatalitik, sedangkan EPD lebih fokus pada pembuatan lapisan antarmuka untuk meningkatkan kinerja fotovoltaiik (Peiris at al., 2018).

Tabel 2. Aplikasi material komposit rGO-TiO₂ berbagai metode sintesis pada limbah warna

Ref	Material Katalis	Metode	Variabel	Polutan	%Degradasi
(Deshmukh et al., 2020)	rGO/TiO ₂	Ultrasonikasi	Dosis katalis (1-3 g/l) & pH (2, 3, 4, 11.9, 13.2)	Metilen Biru	91.3% pada pH 13.2 dosis katalis 2 g/L.
(Prabhakar et al., 2017)	Zr-TiO ₂ -rGO	Sol-Gel	Persen massa GO (1-10%)	Eosin Biru	96% pada GO 5%.
(Babu et al., 2019)	CuO-TiO ₂ /rGO	Impregnasi	Massa GO (0, 1, 2, 3%), Dosis Katalis (0-1,25 mg/l), konsentrasi zat warna (0,01 Mm-0,04 Mm)	Metil Orange	99% pada GO 2%
(Noormohammadi & Sanjabi, 2020)	rGO/TiO ₂	Elektroforesis	Persen massa GO 0.2, 0.4, 0.6 and 0.8 g/L	Metilen biru	19% pada GO 0,8 g/l
(Quang et al., 2021)	ZnO-TiO ₂ /rGO	Ultrasonikasi	Waktu iradiasi UV : 40, 60, dan 80 menit, Dosis fotokatalis: 100, 200, dan 300 mg/L, konsentrasi MB: 10, 20, dan 30 mg/L	Metilen biru	99% dengan waktu iradiasi UV selama 63,5 menit, dosis fotokatalis sebesar 252,5 mg/L, dan konsentrasi MB sebesar 20 mg/L

Banyak metode yang bisa dilakukan dalam mensintesis material fotokatalis dan diaplikasikan dalam mendegradasi limbah warna. Secara keseluruhan, penelitian-penelitian

tersebut menunjukkan bahwa kombinasi material katalis dan metode yang tepat dapat secara signifikan meningkatkan efisiensi degradasi polutan warna dalam air. Variabel seperti dosis katalis, waktu iradiasi UV, dan konsentrasi polutan juga memainkan peran penting dalam efektivitas proses degradasi

4. KESIMPULAN

Artikel ini mengkaji berbagai metode sintesis rGO-TiO₂ dan aplikasi mereka dalam pengolahan limbah warna, seperti hidrotermal, sol-gel, ultrasonikasi, impregnasi basah, elektrospinning, dan elektroforesis. Metode hidrotermal dan sol-gel meningkatkan aktivitas fotokatalitik dengan menghasilkan komposit TiO₂-rGO yang efisien dalam degradasi pewarna. Ultrasonikasi efektif dalam memuat nanopartikel TiO₂ ke rGO, sementara impregnasi basah meningkatkan kinerja fotokatalitik meski menurunkan luas permukaan BET. Elektroforesis meningkatkan interaksi rGO dan TiO₂, dan elektrospinning menghasilkan nanofiber TiO₂ yang terintegrasi dengan rGO, mengurangi band gap dan meningkatkan aktivitas fotokatalitik. Secara keseluruhan, pilihan metode tergantung pada aplikasi spesifik dan sifat material yang diinginkan.

DAFTAR PUSTAKA

- Akyüz, D. (2021). *rGO-TiO₂-CdO-ZnO-Ag photocatalyst for enhancing photocatalytic degradation of methylene blue*. 48(April), 480–488.
- Al-Nuaim, M. A., Alwasiti, A. A., & Shnain, Z. Y. (2023). The photocatalytic process in the treatment of polluted water. *Chemical Papers*, 77(2), 677–701. <https://doi.org/10.1007/s11696-022-02468-7>
- Alam, U., Khan, A., Ali, D., Bahnemann, D., & Muneer, M. (2018). Comparative photocatalytic activity of sol-gel derived rare earth metal (La, Nd, Sm and Dy)-doped ZnO photocatalysts for degradation of dyes. *RSC Advances*, 8(31), 17582–17594. <https://doi.org/10.1039/c8ra01638k>
- Alizadeh, S., Fallah, N., & Nikazar, M. (2019). An ultrasonic method for the synthesis, control and optimization of CdS/TiO₂ 2 core-shell nanocomposites. *RSC Advances*, 9(8), 4314–4324. <https://doi.org/10.1039/c8ra010155h>
- Alkharabsheh, S., McMichael, S., Singhal, A., Rioja-Cabanillas, A., Zamora, P., Monsalvo, V., Rogalla, F., Byrne, J. A., & Fernández-Ibáñez, P. (2024). Bench-scale photoelectrocatalytic reactor utilizing rGO-TiO₂ photoanodes for the degradation of contaminants of emerging concern in water. *Process Safety and Environmental Protection*, 182(October 2023), 833–844. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.12.009>
- 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>
- Ayala, I. V., Mejía-Ospino, E., Gonzalez-Arias, C., Cabanzo-Hernández, R., & V-Niño, E. D. (2024). Evaluation of sol-gel and solvothermal method on titanium dioxide and reduced graphene oxide nanocomposite. *Journal of Physics: Conference Series*, 2726(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2726/1/012003>
- Babu, S. G., Karthik, P., John, M. C., Lakhera, S. K., Ashokkumar, M., Khim, J., & Neppolian, B. (2019). Synergistic effect of sono-photocatalytic process for the degradation of organic pollutants using CuO-TiO₂/rGO. *Ultrasonics Sonochemistry*, 50(September 2018), 218–

223. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.09.021>
- Babuji, P., Thirumalaisamy, S., Duraisamy, K., & Periyasamy, G. (2023). Human Health Risks due to Exposure to Water Pollution: A Review. *Water (Switzerland)*, 15(14), 1–15. <https://doi.org/10.3390/w15142532>
- Barai, D. P., Bhanvase, B. A., & Saharan, V. K. (2019). Reduced Graphene Oxide-Fe₃O₄ Nanocomposite Based Nanofluids: Study on Ultrasonic Assisted Synthesis, Thermal Conductivity, Rheology, and Convective Heat Transfer [Research-article]. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 58(19), 8349–8369. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.8b05733>
- Daryakenari, A. A., Mosallanejad, B., Zare, E., Daryakenari, M. A., Montazeri, A., Apostoluk, A., & Delaunay, J. J. (2021). Highly efficient electrocatalysts fabricated via electrophoretic deposition for alcohol oxidation, oxygen reduction, hydrogen evolution, and oxygen evolution reactions. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(10), 7263–7283. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.11.261>
- Deraz, N. M. (2018). The comparative jurisprudence of catalysts preparation methods: II. Deposition-precipitation and adsorption methods. *Journal of Industrial and Environmental Chemistry*, 2(5), 1–5. <http://www.alliedacademies.org/journal-industrial-environmental-chemistry/>
- Deshmukh, S. P., Kale, D. P., Kar, S., Shirsath, S. R., Bhanvase, B. A., Saharan, V. K., & Sonawane, S. H. (2020). Ultrasound assisted preparation of rGO/TiO₂ nanocomposite for effective photocatalytic degradation of methylene blue under sunlight. *Nano-Structures and Nano-Objects*, 21, 100407. <https://doi.org/10.1016/j.nanoso.2019.100407>
- Elsayed Talat Helmy; Ahmed El Nemr; Mahmoud Mousa; Esam Arafa; Shady Eldafrawy. (2018). Photocatalytic degradation of organic dyes pollutants in the industrial textile wastewater by using synthesized TiO₂, C-doped TiO₂, S-doped TiO₂ and C,S co-doped TiO₂ nanoparticles. *Journal of Water and Environmental Nanotechnology*, 3(2), 116–127. <https://doi.org/10.22090/jwent.2018.02.003>
- Hou, Y., Pu, S., Shi, Q., Mandal, S., Ma, H., Xue, S., Cai, G., & Bai, Y. (2019). Ultrasonic impregnation assisted in-situ photoreduction deposition synthesis of Ag/TiO₂/rGO ternary composites with synergistic enhanced photocatalytic activity. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 104, 139–150. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2019.08.023>
- Joshi, A. S., Elamurugu, E., & Leela, S. (2024). *Impact of Graphene oxide (GO) and reduced Graphene Oxide (rGO) on the TiO₂ thin film composite (TiO₂: GO / rGO) photoanodes*. 9(June).
- Kaus, N. H. M., Rithwan, A. F., Adnan, R., Ibrahim, M. L., Thongmee, S., & Yusoff, S. F. M. (2021). Effective strategies, mechanisms, and photocatalytic efficiency of semiconductor nanomaterials incorporating rgo for environmental contaminant degradation. *Catalysts*, 11(3), 1–27. <https://doi.org/10.3390/catal11030302>
- Kiwaan, H. A., Atwee, T. M., Azab, E. A., & El-Bindary, A. A. (2020). Photocatalytic degradation of organic dyes in the presence of nanostructured titanium dioxide. *Journal of Molecular Structure*, 1200, 127115. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2019.127115>
- Kumari, H., Sonia, Suman, Ranga, R., Chahal, S., Devi, S., Sharma, S., Kumar, S., Kumar, P., Kumar, S., Kumar, A., & Parmar, R. (2023). A Review on Photocatalysis Used For Wastewater Treatment: Dye Degradation. In *Water, Air, and Soil Pollution* (Vol. 234, Issue 6). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/s11270-023-06359-9>
- Kusiak-Nejman, E., Wanag, A., Kapica-Kozar, J., Kowalczyk, Ł., Zgrzebnicki, M., Tryba, B., Przepiórski, J., & Morawski, A. W. (2020). Methylene blue decomposition on TiO₂/reduced graphene oxide hybrid photocatalysts obtained by a two-step hydrothermal

- and calcination synthesis. *Catalysis Today*, 357(January 2019), 630–637. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2019.04.078>
- Li, J., Huang, L., Jiang, X., Zhang, L., & Sun, X. (2021). Preparation and characterization of ternary Cu/Cu₂O/C composite: An extraordinary adsorbent for removing anionic organic dyes from water. *Chemical Engineering Journal*, 404(August 2020), 127091. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.127091>
- Liu, J., Wang, P., Qu, W., Li, H., Shi, L., & Zhang, D. (2019). Nanodiamond-decorated ZnO catalysts with enhanced photocorrosion-resistance for photocatalytic degradation of gaseous toluene. *Applied Catalysis B: Environmental*, 257(June), 117880. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2019.117880>
- Luna-Sanguino, G., Tolosana-Moranchel, A., Duran-Valle, C., Faraldos, M., & Bahamonde, A. (2019). Optimizing P25-rGO composites for pesticides degradation: Elucidation of photo-mechanism. *Catalysis Today*, 328(July 2018), 172–177. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2019.01.025>
- Martina Kocijan 1,*, Lidija Čurković 1,*, D. L. 1, , Katarina Mužina 2, Ivana Bačić 3, T. R. 4, 4, M. P., & Igor Bdikin 5, Gonzalo Otero-Irurueta 5, M. J. H. 5 and G. G. 5. (2021). *applied sciences Graphene-Based TiO₂ Nanocomposite for Photocatalytic Degradation of Dyes in Aqueous Solution under Solar-Like Radiation*. 1–15.
- Nasr, M., Balme, S., Eid, C., Habchi, R., Miele, P., & Bechelany, M. (2017). Enhanced visible-light photocatalytic performance of electrospun rGO/TiO₂ composite nanofibers. *Journal of Physical Chemistry C*, 121(1), 261–269. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.6b08840>
- Nikmah. (2019). Pengaruh Variasi Temperatur Kalsinasi Komposit Rgo/Zno/Tio₂ Terhadap Sifat Fotokatalitik Untuk Degradasi RhodaminE-B.
- Noormohammadi, E., & Sanjabi, S. (2020). Photocatalytic Activity and Wettability of RGO/TiO₂ Nanocomposites Prepared by Electrophoretic Co-Deposition. *Surface Review and Letters*, 27(3), 9–11. <https://doi.org/10.1142/S0218625X19501117>
- Oh, W. Da, & Lim, T. T. (2019). Design and application of heterogeneous catalysts as peroxydisulfate activator for organics removal: An overview. *Chemical Engineering Journal*, 358(July 2018), 110–133. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.09.203>
- Peiris, D. S. U., Ekanayake, P., & Petra, M. I. (2018). Stacked rGO–TiO₂ photoanode via electrophoretic deposition for highly efficient dye-sensitized solar cells. *Organic Electronics*, 59(May), 399–405. <https://doi.org/10.1016/j.orgel.2018.05.059>
- Prabhakar Rao, N., Chandra, M. R., & Rao, T. S. (2017). Synthesis of Zr doped TiO₂/reduced Graphene Oxide (rGO) nanocomposite material for efficient photocatalytic degradation of Eosin Blue dye under visible light irradiation. *Journal of Alloys and Compounds*, 694, 596–606. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.09.329>
- Prima, E. C., Utami, M. P., Setiawan, A., & Suhendi, E. (2022). Review Penggunaan Reduced Graphene Oxide/TiO₂ sebagai Fotoelektrode pada Dye-Sensitized Solar Cell. *JIPFRI (Jurnal Inovasi Pendidikan Fisika Dan Riset Ilmiah)*, 6(1), 1–9. <https://doi.org/10.30599/jipfri.v6i1.1146>
- Purwaningsih, H., Suari, N. M. I. P., Widiyastuti, W., & Setyawan, H. (2022). Preparation of rGO/MnO₂ Composites through Simultaneous Graphene Oxide Reduction by Electrophoretic Deposition. *ACS Omega*, 7(8), 6760–6767. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c06297>
- Quang, T., Viet, Q., Hoang, V., Thi, N., & Giang, H. (2021). Colloids and Surfaces A : Physicochemical and Engineering Aspects Statistical screening and optimization of photocatalytic degradation of methylene blue by ZnO – TiO₂ / rGO nanocomposite. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 629(August), 127464. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.127464>

- Rahmat, S. T., Tan, W. K., Kawamura, G., Matsuda, A., & Lockman, Z. (2019). Facile fabrication of rGO/Rutile TiO₂ nanowires as photocatalyst for Cr(VI) Reduction. *Materials Today: Proceedings*, 17, 1143–1151. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.06.543>
- Rahmawati, A., & Kusumawati, D. H. (2020). Review : Komposit Tio₂/Rgo Sebagai Fotokatalis Untuk Mendegradasi Zat Warna. *Inovasi Fisika Indonesia*, 9(2), 78–84. <https://doi.org/10.26740/ifi.v9n2.p78-84>
- Ruid, M., Miguel, A. Á., Cruz-quesada, G., Rivera-utrilla, J., & Manuel, S. (2020). Ethylparaben Degradation. *Journal of Catalysts*.
- Samsudin, M. F. R., Mahmood, A., & Sufian, S. (2018). Enhanced photocatalytic degradation of wastewater over RGO-TiO₂/BiVO₄ photocatalyst under solar light irradiation. *Journal of Molecular Liquids*, 268, 26–36. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.05.012>
- Scarpelli, F., Mastropietro, T. F., Poerio, T., & Godbert, N. (2018). Mesoporous TiO₂ Thin Films: State of the Art. *Titanium Dioxide - Material for a Sustainable Environment*, June. <https://doi.org/10.5772/intechopen.74244>
- Teh, C. Y., Wu, T. Y., & Juan, J. C. (2017). An application of ultrasound technology in synthesis of titania-based photocatalyst for degrading pollutant. *Chemical Engineering Journal*, 317, 586–612. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.01.001>
- Tolosana-Moranchel, Á., Manassero, A., Satuf, M. L., Alfano, O. M., Casas, J. A., & Bahamonde, A. (2019). TiO₂-rGO photocatalytic degradation of an emerging pollutant: Kinetic modelling and determination of intrinsic kinetic parameters. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(5), 103406. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103406>
- Tsai, T. Y., Zheng, J. R., Yuan, C. S., Chen, T. Y., & Shen, H. (2024). Enhancing the photothermal catalytic efficiencies of Hg₀ and NO with Bi₂O₃/TiO₂ modified by reduced graphene oxide (rGO). *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12(2). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.112124>
- UN. (2017). United Nations World Water Development Report. In *The Sage Learning of Liu Zhi* (Vol. 1).
- Wafi, M. A. E., Ahmed, M. A., Abdel-Samad, H. S., & Medien, H. A. A. (2022). Exceptional removal of methylene blue and p-aminophenol dye over novel TiO₂/RGO nanocomposites by tandem adsorption-photocatalytic processes. *Materials Science for Energy Technologies*, 5, 217–231. <https://doi.org/10.1016/j.mset.2022.02.003>
- Wang, B., Wei, K., Mo, X., Hu, J., He, G., Wang, Y., Li, W., & He, Q. (2019). Improvement in Recycling Times and Photodegradation Efficiency of Core-Shell Structured Fe₃O₄@C-TiO₂ Composites by pH Adjustment. *ES Materials and Manufacturing*, 4, 51–57. <https://doi.org/10.30919/esmm5f215>
- Zhang, S., Xu, J., Hu, J., Cui, C., & Liu, H. (2017). Interfacial Growth of TiO₂-rGO Composite by Pickering Emulsion for Photocatalytic Degradation. *Langmuir*, 33(20), 5015–5024. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.7b00719>