

Inovasi Terbaru pada Fotokatalis Karbon dalam Meningkatkan Kinerja Fotokatalitik: *Systematic Literature Review*

Mitranikasih Laia

Ilmu Komputer, Universitas Nias Raya, Indonesia

Email: mitranikasihlaia@uniraya.ac.id

Abstract

Photocatalysis is one of the environmentally friendly technologies with great potential to address global issues related to pollution and the demand for clean energy. However, limitations of conventional photocatalyst materials, such as low light absorption and high electron-hole recombination rates, have hindered optimal efficiency. This review highlights the role of carbon-based materials as the latest innovation in enhancing photocatalytic performance. Various forms of carbon materials, including graphene, carbon nanotubes (CNTs), carbon quantum dots (CQDs), and porous carbon, have been shown to improve charge separation, broaden the light absorption spectrum into the visible region, and enhance the structural stability of photocatalysts. Literature analysis indicates that the integration of carbon with semiconductors significantly increases pollutant degradation efficiency, cycle stability, and the potential application in renewable energy production. Moreover, the utilization of biomass waste as a source of porous carbon opens opportunities for more economical, sustainable, and eco-friendly technologies. This article provides a comprehensive overview of research progress, performance enhancement mechanisms, and future development directions of carbon-based photocatalysts, which are expected to contribute to innovative solutions in the fields of energy and environmental sustainability.

Keywords: Carbon Photocatalysts, Photocatalytic Performance, Graphene, CNTs, CQDs.

Abstrak

Fotokatalisis merupakan salah satu teknologi ramah lingkungan yang berpotensi besar dalam menjawab permasalahan global terkait polusi dan kebutuhan energi bersih. Namun, keterbatasan pada material fotokatalis konvensional, seperti rendahnya serapan cahaya dan tingginya tingkat rekombinasi elektron-hole, menyebabkan efisiensi proses ini belum optimal. Kajian ini menyoroti peran material berbasis karbon sebagai inovasi terbaru dalam meningkatkan kinerja fotokatalitik. Berbagai bentuk material karbon, seperti grafena, karbon nanotube (CNTs), carbon quantum dots (CQDs), dan karbon berpori, terbukti mampu memperbaiki pemisahan muatan, memperluas spektrum penyerapan cahaya hingga wilayah tampak, serta meningkatkan stabilitas struktural fotokatalis. Analisis literatur menunjukkan bahwa integrasi karbon dengan semikonduktor memberikan peningkatan signifikan pada efisiensi degradasi polutan, kestabilan siklus, serta prospek penerapan pada produksi energi terbarukan. Selain itu, pemanfaatan limbah biomassa sebagai sumber karbon berpori membuka peluang untuk menghadirkan teknologi yang lebih ekonomis, berkelanjutan, dan ramah lingkungan. Artikel ini memberikan gambaran menyeluruh mengenai kemajuan riset, mekanisme peningkatan performa, serta arah pengembangan fotokatalis karbon di masa depan, yang diharapkan dapat mendukung terciptanya solusi inovatif dalam bidang energi dan lingkungan.

Kata Kunci: Fotokatalis Karbon, Kinerja Fotokatalitik, Grafena, CNTs, CQDs.

1. PENDAHULUAN

Permasalahan lingkungan global yang semakin kompleks, seperti polusi air, pencemaran udara, dan meningkatnya kebutuhan energi bersih, telah mendorong perkembangan teknologi ramah lingkungan yang berkelanjutan (Mohamadpour & Amani, 2023). Salah satu solusi yang banyak diteliti adalah teknologi fotokatalisis, yaitu

pemanfaatan energi cahaya untuk mempercepat reaksi kimia. Teknologi ini dinilai potensial karena mampu mendukung berbagai aplikasi, mulai dari degradasi polutan organik, desinfeksi mikroba, hingga produksi energi bersih melalui fotokatalisis air (Xu, 2022; RSC Advances, 2021). Namun, efisiensi fotokatalisis masih menghadapi berbagai keterbatasan, terutama terkait rendahnya serapan cahaya dan cepatnya rekombinasi pasangan elektron-hole pada material fotokatalis konvensional (Zhou, 2021; Khan, 2021). Oleh karena itu, dibutuhkan inovasi material baru yang memiliki aktivitas fotokatalitik lebih tinggi, stabilitas yang baik, serta kompatibilitas untuk aplikasi berskala luas (Lu, 2021). Dalam beberapa tahun terakhir, material berbasis karbon seperti grafena, karbon nanotube, karbon kuantum dots, dan karbon berpori telah menarik perhatian peneliti sebagai kandidat fotokatalis maupun komposit pendukung (Amalina et al., 2022; Budiarmo et al., 2024; Yang, 2023). Material karbon memiliki sifat unik, antara lain konduktivitas listrik yang baik, luas permukaan spesifik yang tinggi, stabilitas kimia yang kuat, serta kemampuan untuk meningkatkan pemisahan muatan fotogenik (Ganaie et al., 2024; Gupta et al., 2022). Keunggulan tersebut membuat karbon berperan penting dalam meningkatkan performa fotokatalis, baik melalui modifikasi permukaan, pembentukan heterostruktur, maupun integrasi dengan semikonduktor lain (Xu et al., 2023; De Angelis et al., 2023).

Berbagai penelitian melaporkan bahwa penambahan material karbon dapat memperluas spektrum penyerapan cahaya, menurunkan laju rekombinasi elektron-hole, dan pada akhirnya meningkatkan efisiensi fotokatalitik. Selain itu, keragaman bentuk morfologi dan kemampuan rekayasa struktur membuat karbon menjadi material multifungsi yang adaptif terhadap kebutuhan aplikasi energi bersih maupun pengolahan lingkungan. Berdasarkan latar belakang tersebut, artikel ini menyajikan tinjauan literatur terkini (mini review) mengenai kemajuan riset fotokatalis berbasis karbon. Fokus pembahasan meliputi jenis-jenis material karbon yang digunakan, mekanisme peningkatan kinerja fotokatalitik, serta peluang pengembangan di masa mendatang. Dengan adanya kajian ini diharapkan dapat memberikan gambaran menyeluruh mengenai peran penting karbon dalam meningkatkan performa fotokatalisis, sekaligus membuka arah penelitian baru untuk mewujudkan teknologi energi dan lingkungan yang lebih berkelanjutan.

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan Systematic Literature Review (SLR) untuk menelaah secara kritis perkembangan riset mengenai fotokatalis berbasis karbon dalam peningkatan kinerja fotokatalitik (RSC Advances, 2021; Xu, 2022). Metode ini dipilih karena memungkinkan peneliti menyusun, menganalisis, dan menyintesis hasil penelitian terdahulu secara terstruktur, sehingga diperoleh gambaran menyeluruh mengenai tren, tantangan, serta peluang pengembangan di masa depan (Mohamadpour & Amani, 2023; Yang, 2023).

2.2 Strategi Pencarian Literatur

Pencarian artikel dilakukan secara sistematis pada basis data ilmiah bereputasi, antara lain Scopus, Web of Science, ScienceDirect, SpringerLink, Wiley Online Library, serta portal nasional Garuda (Garba Rujukan Digital Indonesia). Kata kunci yang digunakan meliputi kombinasi berikut:

1. *“carbon-based photocatalyst”*
2. *“enhanced photocatalytic activity”*
3. *“graphene”, “carbon nanotube”, “carbon quantum dots”*

4. “*carbon porous material*”
5. serta padanan dalam bahasa Indonesia seperti “*fotokatalis karbon*” dan “*aktivitas fotokatalitik*”.

Pencarian dibatasi pada artikel yang dipublikasikan selama periode 2010–2023 untuk memastikan relevansi dengan perkembangan terkini.

2.3 Kriteria Inklusi dan Eksklusi

Agar telaah lebih fokus, ditetapkan kriteria sebagai berikut:

1. Inklusi:
 - a. Artikel penelitian asli (*original research*) maupun artikel ulasan (*review*).
 - b. Dipublikasikan pada jurnal bereputasi internasional (Scopus/WoS) atau nasional terakreditasi (SINTA 1–2).
 - c. Membahas penggunaan material karbon (grafena, CNTs, CQDs, karbon berpori) dalam sistem fotokatalitik.
2. Eksklusi:
 - a. Artikel prosiding tanpa *peer review*.
 - b. Paten, laporan teknis, atau dokumen non-ilmiah.
 - c. Artikel yang tidak tersedia dalam bahasa Inggris atau Indonesia.

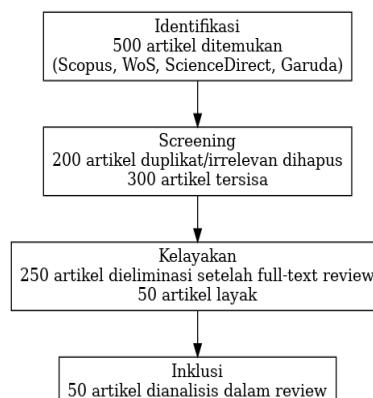
Tabel 1. Kriteria inklusi dan eksklusi literatur

Kriteria	Inklusi	Eksklusi
Jenis dokumen	Artikel penelitian & review peer-reviewed	Prosiding tanpa review, paten, laporan non-ilmiah
Periode	2010–2023	< 2010
Bahasa	Inggris/Indonesia	Bahasa lain
Relevansi	Fotokatalis berbasis karbon & peningkatan fotokatalitik	Topik tidak terkait fotokatalis

2.4 Proses Seleksi Literatur

Seleksi dilakukan melalui empat tahap, sesuai pedoman PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses):

1. Identifikasi: Artikel dikumpulkan dari berbagai basis data sesuai kata kunci.
2. Screening: Duplikasi dan judul yang tidak relevan dihapus.
3. Kelayakan (Eligibility): Teks penuh dianalisis untuk memastikan kesesuaian dengan topik.
4. Inklusi: Artikel akhir yang memenuhi syarat dianalisis mendalam.



Gambar 1. Alur seleksi literatur berdasarkan metode PRISMA

2.5 Teknik Analisis Data

Data dianalisis menggunakan pendekatan manual dengan bantuan perangkat lunak VOSviewer untuk memetakan tren publikasi dan kata kunci dominan, serta Microsoft Excel untuk tabulasi dan visualisasi data kuantitatif (Gupta et al., 2022; Amalina et al., 2022). Artikel yang lolos seleksi dianalisis secara deskriptif-komparatif dengan memperhatikan:

1. Jenis material karbon yang digunakan (grafena, CNTs, CQDs, biochar) (Xu, 2022; Yang, 2023).
2. Teknik sintesis atau modifikasi yang diterapkan (Budiarso et al., 2024; De Angelis et al., 2023).
3. Hasil karakterisasi material (struktur, luas permukaan, serapan cahaya, stabilitas) (Zhou, 2021; Khan, 2021).
4. Kinerja fotokatalitik (efisiensi degradasi polutan, respon spektrum, stabilitas siklus) (Ganaie et al., 2024; Doong et al., 2022).

Data dari berbagai artikel disintesis untuk mengidentifikasi pola umum, keunggulan masing-masing material, keterbatasan teknologi, serta potensi pengembangan lebih lanjut (Mohamadpour & Amani, 2023; RSC Advances, 2021).

2.6 Validasi Kajian

Untuk menjaga validitas, hasil review dibandingkan dengan publikasi ulasan terdahulu sehingga konsistensi analisis dapat terjamin (RSC Advances, 2021; Xu, 2022; Yang, 2023). Keterbatasan metodologi ini terletak pada ketersediaan data dalam publikasi dan periode pencarian yang dibatasi (Mohamadpour & Amani, 2023; Amalina et al., 2022).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Jenis Material Karbon untuk Fotokatalis

Material berbasis karbon telah banyak digunakan dalam pengembangan fotokatalis karena memiliki sifat unik seperti luas permukaan yang besar, konduktivitas listrik tinggi, serta kemampuan untuk memfasilitasi transfer elektron (Xu, 2022; Mohamadpour & Amani, 2023). Beberapa jenis material karbon yang sering diteliti antara lain grafena, karbon nanotube (CNTs), karbon kuantum dots (CQDs), karbon berpori, serta biochar (Yang, 2023; Amalina et al., 2022). Setiap material menunjukkan karakteristik berbeda dalam meningkatkan performa fotokatalitik:

1. Grafena dikenal memiliki konduktivitas elektronik sangat baik dan mampu berperan sebagai jembatan transfer elektron, sehingga dapat mengurangi laju rekombinasi pasangan elektron-hole (Lu, 2021; Zhou, 2021).
2. Karbon nanotube (CNTs) memiliki struktur tubular yang memungkinkan transportasi muatan lebih efisien, sekaligus meningkatkan stabilitas struktur fotokatalis (Khan, 2021; De Angelis et al., 2023).
3. Carbon Quantum Dots (CQDs) efektif memperluas serapan cahaya hingga ke wilayah tampak, sehingga meningkatkan pemanfaatan energi foton (Budiarso et al., 2024; Xu et al., 2023).
4. Karbon berpori dan biochar yang berasal dari biomassa menawarkan keunggulan ramah lingkungan serta biaya rendah, dengan kapasitas adsorpsi tinggi yang mendukung proses degradasi polutan (Amalina et al., 2022; Ganaie et al., 2024; Gupta et al., 2022).

3.2 Mekanisme Peningkatan Aktivitas Fotokatalitik

Integrasi material karbon dengan semikonduktor fotokatalis terbukti meningkatkan kinerja melalui beberapa mekanisme:

1. Peningkatan transfer muatan – Karbon bertindak sebagai konduktor yang memfasilitasi pemisahan elektron dan hole, sehingga mengurangi rekombinasi (Zhou, 2021; De Angelis et al., 2023).
2. Perluasan spektrum serapan cahaya – Kehadiran karbon, khususnya CQDs, mampu menyerap cahaya tampak sehingga memperluas aktivitas fotokatalis di luar wilayah UV (Budiarmo et al., 2024; Xu et al., 2023).
3. Stabilitas struktural – CNTs dan grafena berkontribusi terhadap ketahanan fotokatalis dalam siklus penggunaan jangka panjang (Khan, 2021; Yang, 2023).
4. Efek permukaan dan porositas – Karbon berpori memberikan situs aktif lebih banyak bagi adsorpsi molekul reaktan, yang berimplikasi pada peningkatan efisiensi degradasi polutan (Amalina et al., 2022; Ganaie et al., 2024; Gupta et al., 2022).

3.3 Perbandingan Kinerja Material Karbon

Hasil studi literatur menunjukkan bahwa masing-masing material karbon memberikan kontribusi yang signifikan, meskipun dengan keunggulan yang berbeda. Sebagai contoh, komposit TiO_2 -grafena memperlihatkan peningkatan degradasi polutan organik hingga dua kali lipat dibanding TiO_2 murni. Sementara itu, CQDs- TiO_2 mampu memperluas respon cahaya ke wilayah tampak, yang sangat penting untuk aplikasi energi surya. CNTs juga sering digunakan sebagai kerangka konduktif yang stabil untuk mendukung reaksi redoks.

Tabel 2. Perbandingan performa fotokatalis berbasis karbon

Jenis Karbon	Metode Sintesis	Hasil Kinerja Fotokatalitik
Grafena	Reduksi oksida grafena + deposisi TiO_2	Degradasi metilen biru meningkat ~2x dibanding TiO_2 murni
Karbon Nanotube (CNTs)	CVD + integrasi dengan ZnO/TiO_2	Stabilitas siklus lebih tinggi, efisiensi degradasi polutan hingga 85%
Carbon Quantum Dots	Hidrotermal + komposit TiO_2	Respon spektrum meluas ke cahaya tampak, efisiensi degradasi mencapai 90%
Karbon Berpori (Biomassa)	Karbonisasi biomassa + aktivasi kimia	Biaya rendah, peningkatan kapasitas adsorpsi & efisiensi degradasi 70–80%

3.4 Tren Penelitian dan Tantangan

Tren penelitian saat ini mengarah pada penggunaan material karbon hibrida, misalnya kombinasi grafena-CQDs atau CNTs-grafena, untuk memperoleh sinergi keunggulan masing-masing material. Selain itu, pemanfaatan limbah biomassa sebagai sumber karbon berpori juga menjadi fokus karena mendukung prinsip keberlanjutan dan ekonomi sirkular. Namun, tantangan yang masih dihadapi antara lain:

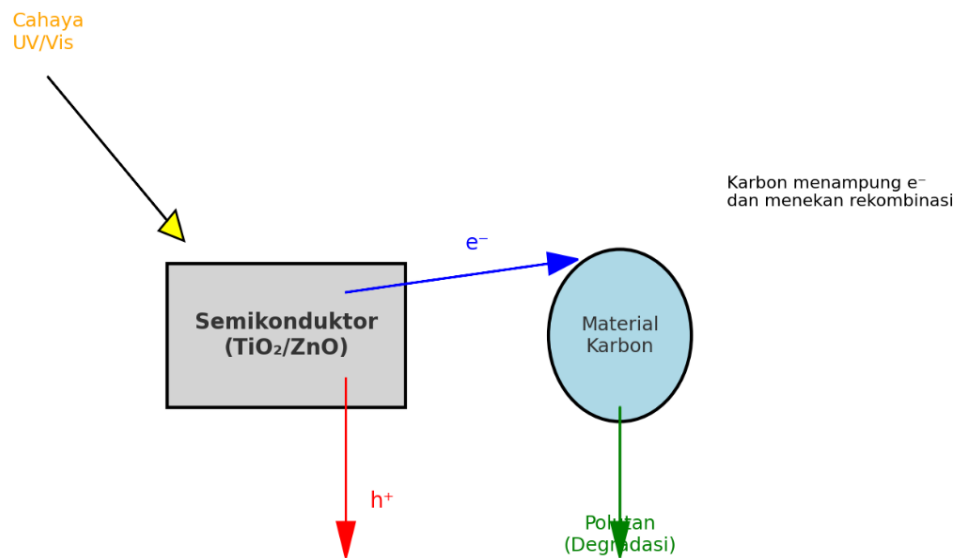
1. Konsistensi kualitas material karbon dari sumber biomassa.
2. Kompleksitas proses sintesis yang masih memerlukan biaya tinggi.
3. Keterbatasan dalam memahami mekanisme fundamental interaksi antara karbon dengan semikonduktor pada skala atomik.

3.5 Implikasi terhadap Aplikasi Energi dan Lingkungan

Hasil kajian menunjukkan bahwa pengembangan fotokatalis berbasis karbon memiliki prospek luas, baik untuk aplikasi energi terbarukan (seperti pemisahan air untuk produksi hidrogen dan sel surya) maupun lingkungan (degradasi limbah organik, detoksifikasi polutan, serta desinfeksi mikroba). Dengan demikian, penelitian lebih lanjut diperlukan untuk menyempurnakan desain material, menekan biaya produksi, dan memperkuat implementasi skala industri.

3.5 Ilustrasi Mekanisme Kerja

Untuk memperjelas peran karbon dalam sistem fotokatalis, berikut ditampilkan ilustrasi skematis mekanisme peningkatan performa fotokatalitik dengan bantuan material karbon.



Gambar 2. Ilustrasi mekanisme peran material karbon dalam meningkatkan efisiensi fotokatalitik.

4. KESIMPULAN

Kajian ini menunjukkan bahwa material berbasis karbon memiliki peran penting dalam meningkatkan kinerja fotokatalitik melalui mekanisme pemisahan muatan, perluasan serapan cahaya, serta peningkatan stabilitas struktural. Grafena, karbon nanotube, carbon quantum dots, dan karbon berpori masing-masing memberikan kontribusi unik yang dapat dioptimalkan sesuai kebutuhan aplikasi. Integrasi material karbon dengan semikonduktor terbukti mampu menekan rekombinasi elektron-hole sehingga menghasilkan efisiensi fotokatalitik yang lebih tinggi. Pemanfaatan limbah biomassa sebagai sumber karbon berpori juga membuka peluang pengembangan teknologi yang lebih ramah lingkungan dan berbiaya rendah.

REFERENCES

- Amalina, F., Syukor, A., Razak, A., Krishnan, S., Sulaiman, H., Zularisam, A. W., & Nasrullah, M. (2022). Biochar production techniques utilizing biomass waste-derived materials and environmental applications – A review. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 7, 100134. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2022.100134>

- Arshad, A., Iqbal, J., Siddiq, M., et al. (2021). Graphene nanoplatelets tailored MgO nanocomposites: Photocatalytic and antibacterial performance. arXiv. <https://arxiv.org/abs/1701.03352>
- Budiarso, I. J., et al. (2024). Carbon nitride- and graphene-based materials for the development of visible-light-active photocatalysts for wastewater pollutant remediation. *Materials Advances*. <https://doi.org/10.1039/D3MA01078C>
- De Angelis, D., Presel, F., Jabeen, N., et al. (2023). Interfacial 2D oxide enhances photocatalytic activity of graphene/titania via electronic structure modification. arXiv. <https://arxiv.org/abs/2305.06708>
- Doong, R. A., Fatimah, I., Wijayanti, H. K., et al. (2022). Nanocomposite of nickel nanoparticles-impregnated biochar from palm leaves as a highly active magnetic photocatalyst. *Molecules*, 27(13), 4183. <https://doi.org/10.3390/molecules27134183>
- Ganaie, F. A., et al. (2024). SnS₂ decorated biochar: A robust platform for photocatalytic degradation of methylene blue. *New Journal of Chemistry*, 48(9), 5671–5681. <https://doi.org/10.1039/D4NJ00231H>
- Gholizadeh, M., & Hu, X. (2021). Removal of heavy metals with biochar composites: A critical review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(4), 105–107. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105107>
- Gupta, M., Savla, N., Pandit, C., Pandit, S., & Gupta, P. K. (2022). Use of biomass-derived biochar in wastewater treatment and power production: A promising solution for a sustainable environment. *Science of the Total Environment*, 846, 157431. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157431>
- Khan, M. E. (2021). State-of-the-art developments in carbon-based metal nanostructures as photocatalysts. *Nanoscale Advances*, 3(6), 1702–1721. <https://doi.org/10.1039/D1NA00041A>
- Lu, K. Q. (2021). Roles of graphene oxide in heterogeneous photocatalysis. *ACS Materials Au*, 1(1), 7–17. <https://doi.org/10.1021/acsmaterialsau.1c00022>
- Ma, R. (2024). Intense interaction between biochar/g-C₃N₄ promotes visible-light photocatalytic degradation. [Preprint/PMC]. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11188670/>
- Mohamadpour, F., & Amani, A. M. (2023). Photocatalytic systems: Reaction mechanisms and applications. *Environmental Research*, 221, 115192. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115192>
- RSC Advances. (2021). The development of biomass-derived carbon-based photocatalysts for visible-light-driven photodegradation of pollutants: A comprehensive review. *RSC Advances*, 11(42), 25983–25996. <https://doi.org/10.1039/D1RA04150B>
- Wei, Q. (2025). Biochar-mediated carbon nitride and covalent organic heterojunctions for tetracycline degradation. [Preprint/PMC]. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12107554/>
- Xu, R., Wei, G., Xie, Z., et al. (2023). V₂C MXene-modified g-C₃N₄ for enhanced visible-light photocatalytic activity. arXiv. <https://arxiv.org/abs/2310.16414>
- Xu, Y. (2022). Carbon-based nanostructures for emerging photocatalysis. *Carbon Trends*, 7, 100197. <https://doi.org/10.1016/j.cartre.2022.100197>
- Yang, Z. (2023). Recent progress in multifunctional graphene-based materials. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(12), 10345. <https://doi.org/10.3390/ijms241210345>
- Zhou, X. (2021). 2D graphene–TiO₂ composites and their photocatalytic activity. *Frontiers in Energy Research*, 9, 612512. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.612512>