

## Studi Kimia Hijau dalam Pengelolaan Air Limbah: Tinjauan Komprehensif Teknik Pengolahan Tingkat Lanjut

Melinda Syabriyana<sup>1\*</sup>, Windah Jannah<sup>2</sup>, Abdul Sadikin<sup>3</sup>, Ahmad Chairunnas<sup>4</sup>, Subaida Indaryati<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Teknik Kimia, Universitas Serambi Mekkah, Indonesia;

<sup>2</sup>Program Studi Teknik Lingkungan, Universitas Nahdlatul Ulama Nusa Tenggara Barat, Indonesia;

<sup>3</sup>Program Studi Teknologi Industri Pertanian, Universitas Nahdlatul Ulama Kalimantan Timur, Indonesia;

<sup>4</sup>Program Studi Biologi, Universitas Nahdlatul Ulama Sulawesi Tenggara, Indonesia;

<sup>5</sup>Program Studi Agribisnis, Universitas Nahdlatul Ulama Lampung, Indonesia.

### Abstrak

Peningkatan permasalahan lingkungan mendorong perkembangan praktik industri menggunakan integrasi teknologi berbasis kimia dan lingkungan yang berkelanjutan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis secara sistematis bagaimana prinsip kimia hijau atau ramah lingkungan diterapkan untuk meningkatkan keramahan lingkungan dan efisiensi metode pengolahan air limbah. Pencarian literatur yang komprehensif dilakukan di seluruh database utama, dengan fokus pada penelitian yang diterbitkan dari tahun 2010 hingga 2022. Temuan ini mengungkapkan adanya pergeseran signifikan ke arah penggunaan bahan-bahan yang tidak terlalu berbahaya, peningkatan efisiensi energi, dan penggunaan bahan-bahan terbarukan dan biodegradable dalam proses pengolahan air limbah. Tinjauan ini menyoroti tantangan terkait skalabilitas, kelayakan ekonomi, dan aspek peraturan dari pendekatan ramah lingkungan ini. Studi ini memberikan gambaran mengenai tren dan mengidentifikasi arah penelitian dan kebijakan di masa depan terkait kimia hijau dalam pengelolaan air limbah berkelanjutan.

### Kata kunci

Kimia hijau; Pengelolaan air limbah; Teknik kimia; Teknik lingkungan

### Abstract

*Increasing environmental problems encourage the development of industrial practices using the integration of chemical-based and environmentally sustainable technologies. This research aims to systematically analyze how environmentally friendly chemical principles are applied to improve the environmental friendliness and efficiency of wastewater treatment methods. A comprehensive literature search was conducted across major databases, focusing on research published from 2010 to 2022. The findings revealed a significant shift towards the use of less hazardous materials, increased energy efficiency, and the use of renewable materials and*

#### Korespondensi

Melinda Syabriyana

[melindasyabriyana@serambimekkah.ac.id](mailto:melindasyabriyana@serambimekkah.ac.id)

*biodegradable in the waste water treatment process. This review highlights challenges related to the scalability, economic feasibility, and regulatory aspects of this green approach. This study provides an overview of trends and identifies future research and policy directions regarding green chemistry in sustainable wastewater management.*

### **Keywords**

*Chemical engineering; Environmental engineering; Green chemistry; Waste water management*

## **Pendahuluan**

Pengolahan air limbah, sebagai komponen penting dalam pengelolaan lingkungan modern, menghadapi berbagai tantangan mulai dari kompleksitas limbah industri hingga regulasi lingkungan yang ketat untuk menjaga ekosistem akuatik (Jain *et al.*, 2010). Metodologi pengolahan air limbah tradisional, meskipun efektif dalam menangani berbagai polutan, sering kali kurang berkelanjutan dari segi lingkungan, terutama karena konsumsi energi yang tinggi, penggunaan bahan kimia berbahaya, dan generasi limbah sekunder. Realitas ini menuntut pergeseran paradigma menuju pendekatan yang lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan (Hashmi *et al.*, 2021).

Dalam konteks ini, kimia hijau muncul sebagai pendekatan revolusioner, menganjurkan desain produk dan proses kimia yang mengurangi atau menghilangkan penggunaan dan generasi zat berbahaya (Sharma and Sharma, 2022). Prinsip-prinsip kimia hijau, seperti pencegahan limbah, efisiensi energi, dan penggunaan bahan baku terbarukan, sejalan dengan tujuan pengolahan air limbah yang berkelanjutan. Dengan menggabungkan prinsip-prinsip ini, teknologi pengolahan air limbah tidak hanya dapat memitigasi polusi tetapi juga bergerak menuju model operasional yang lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan (Al Jahdaly *et al.*, 2022).

Review ini bertujuan untuk menganalisis secara sistematis integrasi pendekatan kimia hijau dalam teknologi pengolahan air limbah canggih. Dengan mengeksplorasi bagaimana prinsip-prinsip ini diterapkan, ulasan ini berupaya menyoroti inovasi dan efisiensi yang dibawa oleh kimia hijau dalam bidang ini. Fokusnya meluas ke berbagai metodologi pengolahan canggih, termasuk tetapi tidak terbatas pada, bioremediasi, proses oksidasi lanjutan, dan teknologi membran, yang telah menggabungkan prinsip-prinsip kimia hijau baik dalam desain maupun operasinya (Stubbs, Yousaf and Khan, 2022).

Cakupan review ini mencakup beragam studi yang menggambarkan aplikasi kimia hijau dalam pengolahan air limbah, dengan fokus pada artikel yang diterbitkan dalam dekade terakhir. Meskipun review ini bertujuan untuk komprehensif, ia mengakui sifat bidang ini yang terus berkembang dan batasan yang ditetapkan dengan fokus terutama pada artikel jurnal yang ditinjau oleh rekan sejawat. Cakupan geografis studi yang dipertimbangkan bersifat global, mengakui bahwa tantangan dan solusi dalam pengolahan air limbah bersifat universal, meskipun memiliki spesifisitas regional. Pendahuluan ini menetapkan pengantar untuk eksplorasi terperinci mengenai persimpangan antara kimia hijau dan teknologi pengolahan air limbah canggih, menekankan kebutuhan dan potensi integrasi ini dalam mencapai praktik pengelolaan air limbah yang lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan.

## **Metode**

### **Strategi Pencarian Literatur**

Untuk melakukan review yang komprehensif dan sistematis, strategi pencarian literatur yang terstruktur diterapkan. Basis data utama yang digunakan untuk tujuan ini termasuk Web of Science, Scopus, PubMed, dan Google Scholar. Basis data ini dipilih karena cakupan luasnya terhadap jurnal akademik yang ditinjau oleh rekan sejawat di bidang ilmu lingkungan, kimia, dan teknik (James *et al.*, 2022). Pencarian dilakukan menggunakan kombinasi kata kunci dan frasa

seperti "green chemistry" (kimia hijau), "sustainable wastewater treatment" (pengolahan air limbah yang berkelanjutan), "advanced wastewater technologies" (teknologi pengolahan air limbah canggih), dan "eco-friendly wastewater solutions" (solusi pengolahan air limbah yang ramah lingkungan). Pencarian dibatasi pada artikel yang diterbitkan dalam bahasa Inggris dari Januari 2010 hingga Desember 2022, untuk berfokus pada kemajuan terbaru di bidang ini.

### Kriteria Inklusi dan Eksklusi

Kriteria inklusi ditetapkan untuk memilih studi yang secara spesifik membahas aplikasi prinsip kimia hijau dalam teknologi pengolahan air limbah canggih. Artikel dipilih jika mereka memberikan informasi terperinci tentang metode, hasil, dan implikasi dari menerapkan kimia hijau dalam pengolahan air limbah. Review, studi kasus, dan artikel penelitian asli semuanya dipertimbangkan. Kriteria eksklusi termasuk artikel yang tidak fokus pada kimia hijau atau pengolahan air limbah, artikel yang tidak dalam bahasa Inggris, dan publikasi yang lebih tua dari tahun 2010. Selanjutnya, studi yang tidak memiliki data empiris atau detail metodologi yang memadai dikecualikan untuk memastikan kualitas dan relevansi literatur yang diulas (Omran and Baek, 2022).

### Ekstraksi dan Analisis Data

Dari artikel yang dipilih, data relevan diekstrak, termasuk jenis teknologi pengolahan air limbah, prinsip kimia hijau spesifik yang diterapkan, skala studi (laboratorium, pilot, atau skala penuh), dan temuan atau hasil utama. Data ini diorganisir ke dalam kategori tematik untuk memudahkan analisis yang komprehensif. Analisis difokuskan pada identifikasi tren, tantangan, dan inovasi dalam aplikasi kimia hijau untuk pengolahan air limbah. Selain itu, efektivitas pendekatan ini dari segi dampak lingkungan, kelayakan ekonomi, dan skalabilitas dievaluasi (Casti *et al.*, 2022).

Untuk memastikan ketelitian dan reproduktivitas dari review, seluruh proses, dari pencarian literatur hingga analisis data, didokumentasikan secara rinci. Bagian metode ini memberikan gambaran yang transparan tentang prosedur yang diikuti dalam review sistematis ini, memungkinkan replikasi dan verifikasi dari temuan (Ardila-Fierro and Hernández, 2021).

Metodologi yang diuraikan di sini dirancang untuk memastikan review yang menyeluruh dan tidak bias terhadap literatur saat ini mengenai integrasi prinsip kimia hijau ke dalam teknologi pengolahan air limbah canggih, memberikan dasar yang kokoh untuk temuan dan diskusi yang disajikan dalam bagian selanjutnya dari makalah (Kurniawan *et al.*, 2021).

## Hasil dan Pembahasan

### Ikhtisar Studi Terpilih

Penelusuran literatur menghasilkan sejumlah besar penelitian, yang darinya dilakukan seleksi berdasarkan kriteria yang telah ditentukan. Studi yang ditinjau sebagian besar berfokus pada teknologi pengolahan air limbah yang inovatif, seperti proses oksidasi tingkat lanjut, filtrasi membran, dan bioremediasi, semuanya mengintegrasikan prinsip-prinsip kimia ramah lingkungan dalam berbagai tingkatan. Keberagaman dalam ruang lingkup penelitian ini menggarisbawahi luas dan dalamnya penelitian ini, menyoroti sifat beragam penerapan kimia ramah lingkungan dalam pengolahan air limbah (Srivastava *et al.*, 2021).

### Pendekatan Kimia Hijau Diidentifikasi

Tema umum dalam penelitian yang dipilih adalah penekanan pada minimalisasi penggunaan bahan kimia berbahaya. Beberapa penelitian menunjukkan penggunaan reagen biodegradable dan ramah lingkungan dalam proses pengolahan. Selain itu, sejumlah besar penelitian menyoroti penggunaan sumber energi terbarukan, seperti energi matahari dan angin, untuk menggerakkan fasilitas pengolahan, sehingga mengurangi jejak karbon dari pengelolaan air limbah (Gómez-López *et al.*, 2020; Dhaniswara *et al.*, 2022).

## **Inovasi dalam Teknologi Perawatan**

Teknologi inovatif, seperti degradasi fotokatalitik menggunakan bahan nano dan sistem filtrasi berbasis bio, sering kali diperhatikan. Teknologi-teknologi ini tidak hanya menunjukkan efisiensi tinggi dalam menghilangkan polutan namun juga selaras dengan prinsip-prinsip kimia ramah lingkungan dengan menjadi lebih hemat energi dan menghasilkan lebih sedikit limbah sekunder. Penerapan teknologi tersebut menandai perubahan signifikan menuju metode pengolahan air limbah yang lebih berkelanjutan (Yu *et al.*, 2020; Azizah and Dhaniswara, 2021).

## **Efektivitas Pendekatan Kimia Hijau**

Efektivitas pendekatan kimia ramah lingkungan dalam pengolahan air limbah terbukti dari peningkatan efisiensi dan pengurangan dampak lingkungan yang dilaporkan dalam beberapa penelitian. Misalnya, penggunaan proses oksidasi tingkat lanjut mengurangi penggunaan bahan kimia dan konsumsi energi dibandingkan dengan metode konvensional. Efektivitas ini menggarisbawahi potensi kimia hijau untuk merevolusi praktik pengolahan air limbah (Purkait and Hazra, 2020; Widiyanti *et al.*, 2020).

## **Kelayakan dan Skalabilitas Ekonomi**

Aspek ekonomi dari pengintegrasian bahan kimia ramah lingkungan ke dalam pengolahan air limbah telah dibahas dalam banyak penelitian. Meskipun biaya investasi awal kadang-kadang lebih tinggi, manfaat jangka panjang, termasuk pengurangan biaya operasional dan meminimalkan kerusakan lingkungan, lebih ditekankan. Skalabilitas, yang merupakan faktor penting untuk penerapan praktis, ditunjukkan dalam beberapa studi kasus, yang menunjukkan kelayakan penerapan pendekatan ini pada skala industri (Maity *et al.*, 2022; Primadani *et al.*, 2023).

## **Perbandingan dengan Metode Tradisional**

Jika dibandingkan dengan metode pengolahan air limbah tradisional, pendekatan kimia ramah lingkungan menunjukkan keunggulan yang jelas dalam hal keberlanjutan dan dampak terhadap lingkungan. Namun, perlu dicatat juga bahwa metode-metode canggih ini perlu dioptimalkan agar sesuai dengan kapasitas pengolahan dan ketahanan sistem konvensional (Fitri and Rahkadima, 2021; England *et al.*, 2022; Kurniawan *et al.*, 2023).

## **Implikasinya terhadap Kelestarian Lingkungan**

Penerapan kimia hijau dalam pengolahan air limbah mempunyai implikasi signifikan terhadap kelestarian lingkungan berbasis SDGs. Dengan mengurangi penggunaan bahan kimia berbahaya dan konsumsi energi, pendekatan ini berkontribusi terhadap pelestarian ekosistem perairan dan pengurangan emisi gas rumah kaca. Penyelarasan dengan tujuan pembangunan berkelanjutan ini menyoroti dampak yang lebih luas dari pengintegrasian bahan kimia ramah lingkungan ke dalam pengelolaan air limbah (Jiang *et al.*, 2014; Maulana and Pratama, 2021; Novie *et al.*, 2021).

## **Pendalaman Analisis Prinsip Green Chemistry**

Analisis mendalam terhadap studi yang ditinjau mengungkapkan pemahaman yang berbeda tentang bagaimana prinsip-prinsip kimia ramah lingkungan diterapkan. Prinsip pengurangan limbah pada sumbernya, misalnya, ditunjukkan melalui penerapan metode pengolahan yang secara inheren menghasilkan lebih sedikit lumpur dan produk sampingan. Hal ini tidak hanya menyederhanakan pengelolaan limbah tetapi juga mengurangi dampak lingkungan secara keseluruhan dari proses pengolahan (Durand, Lecomte and Villeneuve, 2016; Nathaniela *et al.*, 2023).

## **Peran Nanoteknologi dalam Pengolahan Air Limbah Tingkat Lanjut**

Beberapa penelitian menyoroti peran nanoteknologi dalam meningkatkan efisiensi pengolahan air limbah. Nanomaterial, karena luas permukaan dan reaktivitasnya yang tinggi, menawarkan keuntungan unik dalam menghilangkan polutan. Namun, analisis kritis menimbulkan kekhawatiran mengenai siklus hidup dan nasib bahan nano

ini di lingkungan, sehingga menunjukkan adanya area yang memerlukan penelitian lebih lanjut untuk menyelaraskan sepenuhnya dengan etos kimia ramah lingkungan (Najar *et al.*, 2020; Pramono *et al.*, 2022).

### **Bioremediasi**

Bioremediasi muncul sebagai pendekatan utama yang berkelanjutan dalam literatur yang dikaji. Penggunaan mikroorganisme untuk mendegradasi atau menghilangkan polutan dari air limbah sejalan dengan fokus kimia hijau pada zat-zat yang tidak berbahaya. Penelitian menunjukkan efektivitas bioremediasi dalam mengatasi polutan organik, logam berat, dan kontaminan baru. Namun, variabilitas kinerja mikroba dalam kondisi lingkungan yang berbeda memerlukan penyelidikan lebih lanjut (Srivastava *et al.*, 2022).

### **Pertimbangan Energi dalam Pengolahan Air Limbah**

Efisiensi energi merupakan aspek penting dalam kimia ramah lingkungan, dan relevansinya dalam pengolahan air limbah terbukti dalam penelitian tersebut. Teknologi yang memanfaatkan sumber energi terbarukan atau yang dirancang untuk beroperasi dengan masukan energi yang lebih rendah disoroti sebagai teknologi yang sangat menjanjikan. Fokus pada efisiensi energi ini tidak hanya sejalan dengan kimia ramah lingkungan namun juga menjawab tantangan global dalam mengurangi konsumsi energi dalam proses industri (Ksepko, Klimontko and Kwiecinska, 2019; Rahmayanti *et al.*, 2022).

### **Alternatif Kimia dalam Proses Perawatan**

Penggantian bahan kimia berbahaya dengan alternatif yang lebih aman merupakan tema yang berulang. Hal ini tidak hanya mengurangi toksisitas langsung dari proses pengolahan tetapi juga meminimalkan dampak hilir terhadap kehidupan akuatik dan kesehatan manusia. Namun tinjauan tersebut mengidentifikasi perlunya studi yang lebih komprehensif untuk mengevaluasi kemandirian dan keamanan jangka panjang dari bahan kimia alternatif ini (Kaya and Tabak, 2020; Fitriyah *et al.*, 2022).

### **Integrasi Berbagai Prinsip Kimia Ramah Lingkungan**

Studi yang menunjukkan integrasi berbagai prinsip kimia ramah lingkungan dalam satu proses pengolahan merupakan hal yang patut diperhatikan. Pendekatan integratif tersebut memberikan contoh penerapan kimia ramah lingkungan secara holistik dalam pengolahan air limbah, sehingga menghasilkan sistem yang tidak hanya ramah lingkungan tetapi juga efisien secara ekonomi dan operasional (Ksepko, Klimontko and Kwiecinska, 2019; Farahdiba *et al.*, 2023).

### **Peningkatan Skala dan Aplikasi Industri**

Meskipun penelitian skala laboratorium menunjukkan hasil yang menjanjikan, tinjauan tersebut menekankan tantangan dalam memperluas teknologi ini untuk penerapan industri. Faktor-faktor seperti stabilitas proses, kemampuan beradaptasi terhadap aliran air limbah yang berbeda, dan efektivitas biaya sangat penting dalam peralihan dari laboratorium ke industri. Tinjauan ini memerlukan lebih banyak studi percontohan dan skala penuh untuk mengatasi tantangan-tantangan ini (Sheldon and Brady, 2022).

### **Inovasi Teknologi Berbasis Kewirausahaan**

Wirausahawan sering berada di garis depan dalam mengidentifikasi dan mengembangkan teknologi baru. Dalam konteks kimia hijau, ini bisa berarti menciptakan atau meningkatkan proses pengolahan air limbah yang lebih ramah lingkungan, efisien, dan berkelanjutan. Wirausahawan menggunakan pengetahuan teknis dan kreativitas untuk mengatasi tantangan yang ada dan memenuhi kebutuhan pasar. Penerapan prinsip kimia hijau dalam pengolahan air limbah membuka peluang bisnis yang baru. Ini termasuk produksi dan pemasaran teknologi yang lebih efisien dan ramah

lingkungan, serta layanan konsultasi dan manajemen untuk industri yang ingin mengadopsi praktik-praktik berkelanjutan (Golden *et al.*, 2021; Kalleya *et al.*, 2023).

### **Edukasi dan Kesadaran Lingkungan**

Program pengabdian masyarakat dapat memberikan edukasi tentang pentingnya pengolahan air limbah yang berkelanjutan dan cara-cara untuk mengimplementasikan prinsip kimia hijau. Hal ini bisa melalui workshop, seminar, atau kampanye kesadaran lingkungan di sekolah, universitas, atau komunitas. Pengabdian masyarakat sering melibatkan penerapan teknologi atau metode baru di lingkungan lokal. Ini bisa berupa proyek pilot pengolahan air limbah yang menggunakan prinsip kimia hijau, memberikan demonstrasi praktis dari manfaatnya bagi lingkungan dan kesehatan masyarakat. Pengabdian masyarakat dalam bidang ini sering memerlukan kerjasama dengan pemerintah lokal, lembaga swadaya masyarakat (LSM), dan organisasi lain untuk menerapkan proyek-proyek pengolahan air limbah yang berkelanjutan (Chen *et al.*, 2020; Azis *et al.*, 2023).

### **Implikasi Peraturan dan Kebijakan**

Pentingnya kerangka peraturan dalam memfasilitasi penerapan bahan kimia ramah lingkungan dalam pengolahan air limbah. Mekanisme kebijakan yang efektif dapat memberikan insentif yang diperlukan bagi industri untuk mengadopsi praktik yang lebih ramah lingkungan. Namun, peraturan yang ada saat ini mungkin tidak sepenuhnya mendukung atau memberi insentif pada penerapan teknologi inovatif ini, sehingga hal ini menunjukkan adanya potensi reformasi kebijakan (Chahal, 2022).

### **Persepsi Masyarakat dan Keterlibatan Pemangku Kepentingan**

Persepsi masyarakat dan keterlibatan pemangku kepentingan sangat penting dalam penerapan teknologi baru terkait manajemen sampah dan kimia hijau. Kajian tersebut menunjukkan bahwa peningkatan kesadaran dan pendidikan tentang manfaat pendekatan kimia ramah lingkungan dapat menumbuhkan dukungan masyarakat. Selain itu, pelibatan pemangku kepentingan, termasuk pelaku industri dan masyarakat lokal, dalam pengembangan dan penerapan teknologi ini dapat meningkatkan penerimaan dan keberhasilan teknologi tersebut (Worthington, Kucera and Chalker, 2017).

### **Tantangan dan Keterbatasan**

Meskipun hasilnya menjanjikan, terdapat beberapa tantangan yang teridentifikasi. Hal ini mencakup perlunya penelitian lebih lanjut untuk meningkatkan efisiensi beberapa teknologi ramah lingkungan, tingginya biaya awal untuk menyiapkan sistem pengolahan yang canggih, dan kompleksitas dalam mengintegrasikan sistem ini ke dalam infrastruktur yang ada. Selain itu, lanskap peraturan dan penerimaan masyarakat juga dianggap sebagai hambatan potensial dalam penerapannya secara luas (Raj, Chowdhury and Ali, 2022).

### **Peluang Penelitian Masa Depan**

Terdapat beberapa area penting yang dapat menjadi fokus penelitian di masa depan. Pendekatan-pendekatan berikut ini akan memperluas pemahaman dan penerapan kimia hijau dalam pengolahan air limbah, sebagai berikut:

1. Pengembangan Material Ramah Lingkungan  
Melakukan riset lebih lanjut dalam pengembangan dan pengoptimalan material yang ramah lingkungan, seperti katalis dan adsorben biodegradable, yang dapat digunakan dalam proses pengolahan air limbah.
2. Nanoteknologi dan Dampak Lingkungannya  
Meskipun nanoteknologi menawarkan banyak manfaat, masih diperlukan penelitian lebih mendalam mengenai dampak lingkungan dan keselamatan jangka panjang dari penggunaan nanomaterial dalam pengolahan air limbah.

3. Evaluasi Ekonomi dan Skalabilitas  
Penelitian tentang kelayakan ekonomi dan potensi skalabilitas solusi kimia hijau dalam pengolahan air limbah, khususnya untuk aplikasi skala besar dan industri, merupakan area yang penting untuk dijelajahi.
4. Pengintegrasian Energi Terbarukan  
Mengeksplorasi cara-cara inovatif untuk mengintegrasikan sumber energi terbarukan dalam proses pengolahan air limbah, sehingga mengurangi ketergantungan pada sumber energi konvensional dan menurunkan jejak karbon.
5. Studi Daur Hidup (*Life Cycle Assessment*)  
Melakukan studi daur hidup untuk memahami dampak lingkungan secara keseluruhan dari teknologi pengolahan air limbah yang berbasis kimia hijau, termasuk produksi, operasi, dan pembuangan akhir.
6. Pengelolaan Limbah dan Sisa Proses  
Penelitian tentang bagaimana mengelola dan meminimalkan limbah yang dihasilkan dari proses pengolahan air limbah, serta mencari metode daur ulang dan pemulihan sumber daya yang efektif.
7. Aspek Regulasi dan Kebijakan  
Meneliti bagaimana regulasi dan kebijakan dapat mendukung atau menghambat penerapan teknologi kimia hijau dalam pengolahan air limbah, serta mencari cara untuk menciptakan lingkungan kebijakan yang lebih mendukung.
8. Kerjasama Lintas Disiplin  
Mendorong riset yang menggabungkan keahlian dari berbagai disiplin ilmu, seperti kimia, biologi, teknik, dan ekonomi, untuk mengembangkan solusi yang holistik dan efektif.
9. Pengembangan Indikator Kinerja Berkelanjutan  
Merancang dan menerapkan indikator kinerja yang mencerminkan keberlanjutan dan efektivitas teknologi pengolahan air limbah berbasis kimia hijau.
10. Adopsi Teknologi oleh Industri dan Masyarakat  
Meneliti bagaimana teknologi ini dapat diadopsi lebih luas oleh industri dan masyarakat, termasuk studi tentang penerimaan publik, hambatan adopsi, dan strategi untuk meningkatkan penerapan.

Penelitian di masa depan dalam bidang ini sangat penting untuk mengatasi tantangan global dalam pengolahan air limbah dan untuk mencapai tujuan pengembangan berkelanjutan. Pendekatan-pendekatan ini tidak hanya akan membantu dalam meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan teknologi pengolahan air limbah tetapi juga akan memberikan dampak positif yang signifikan terhadap lingkungan dan kesehatan manusia.

## Kesimpulan

Review sistematis mengenai pendekatan kimia hijau dalam teknologi pengolahan air limbah canggih menunjukkan konvergensi yang menjanjikan antara keberlanjutan lingkungan dan inovasi teknologi. Integrasi prinsip-prinsip kimia hijau, seperti yang terbukti dalam studi yang diulas, menunjukkan kemajuan signifikan dalam meminimalkan penggunaan zat berbahaya, meningkatkan efisiensi energi, dan penerapan bahan yang dapat diperbaharui dan biodegradable dalam proses pengolahan air limbah. Pendekatan tersebut tidak hanya sejalan dengan imperatif global perlindungan lingkungan, tetapi juga menawarkan solusi praktis dan dapat diskalakan untuk tantangan mendesak dalam pengelolaan air limbah. Adopsi metodologi kimia hijau dalam pengolahan air limbah menandakan pergeseran paradigma menuju praktik yang lebih berkelanjutan, mengatasi tujuan ganda pelestarian ekologi dan mitigasi polusi yang efektif.

Meskipun terdapat kemajuan yang menjanjikan, review ini juga menyoroti kebutuhan akan penelitian lebih lanjut, terutama di bidang dampak lingkungan nanoteknologi, kelayakan ekonomi dari alternatif yang lebih hijau, dan skalabilitas solusi pengolahan yang inovatif. Interaksi antara kerangka regulasi, persepsi publik, dan adopsi teknologi muncul sebagai faktor kunci untuk implementasi sukses kimia hijau dalam pengolahan air limbah. Seiring

berkembangnya bidang ini, penting bahwa penelitian dan inisiatif kebijakan di masa depan fokus pada mengatasi tantangan ini, mendorong lingkungan yang kondusif untuk adopsi teknologi berkelanjutan. Pada akhirnya, integrasi berkelanjutan prinsip kimia hijau ke dalam teknologi pengolahan air limbah adalah kunci untuk mencapai masa depan yang lebih berkelanjutan dan bertanggung jawab secara lingkungan.

### Konflik Kepentingan

Tidak ada potensi konflik kepentingan yang relevan dengan artikel ini.

### Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada institusi peneliti atas dukungan pelaksanaan penelitian.

### Daftar Pustaka

- Al Jahdaly, B. A. *et al.* (2022) 'Role of green chemistry in sustainable corrosion inhibition: a review on recent developments', *Materials Today Sustainability*, 20, p. 100242. doi: 10.1016/j.mtsust.2022.100242.
- Ardila-Fierro, K. J. and Hernández, J. G. (2021) 'Sustainability Assessment of Mechanochemistry by Using the Twelve Principles of Green Chemistry', *ChemSusChem*, 14(10), pp. 2145–2162. doi: 10.1002/cssc.202100478.
- Azis, B. *et al.* (2023) 'Teritori Ruang Tradisi Haji Jawa di Perkotaan Indonesia', *Jurnal Desain Interior*, 8(2), p. 99. doi: 10.12962/j12345678.v8i2.18635.
- Azizah, Z. and Dhaniswara, T. K. (2021) 'Integrasi Aspen Plus Dynamics dengan Matlab Simulink (Studi Kasus: Simulasi Proses Distilasi Propana-Isobutana)', *Journal of Chemical Process Engineering*, 6(2), pp. 113–117. doi: 10.33536/jcpe.v6i2.989.
- Casti, F. *et al.* (2022) 'Appealing Renewable Materials in Green Chemistry', *Molecules*, 27(6), p. 1988. doi: 10.3390/molecules27061988.
- Chahal, K.S. (2022) *Green Chemistry for the Development of Eco-Friendly Products*. Edited by Kavita Shakya Chahal and T. Solanki. IGI Global. doi: 10.4018/978-1-7998-9851-1.
- Chen, T.-L. *et al.* (2020) 'Implementation of green chemistry principles in circular economy system towards sustainable development goals: Challenges and perspectives', *Science of The Total Environment*, 716, p. 136998. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.136998.
- Dhaniswara, T. K. *et al.* (2022) 'The Effect of Pre-treatment of Water Hyacinth (*Eichhornia crassipes*) and the Use of Cow Dung on Biogas Production', *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1097(1), p. 012068. doi: 10.1088/1755-1315/1097/1/012068.
- Durand, E., Lecomte, J. and Villeneuve, P. (2016) 'From green chemistry to nature: The versatile role of low transition temperature mixtures', *Biochimie*, 120, pp. 119–123. doi: 10.1016/j.biochi.2015.09.019.
- England, A. *et al.* (2022) 'Treatment of Waste from the Molybdenum Blue Analysis of Phosphate: A Laboratory Experiment in Green Chemistry', *Journal of Chemical Education*, 99(7), pp. 2643–2648. doi: 10.1021/acs.jchemed.1c01248.
- Farahdiba, A. U. *et al.* (2023) 'The present and proposed sustainable food waste treatment technology in Indonesia: A review', *Environmental Technology & Innovation*, 32, p. 103256. doi: 10.1016/j.eti.2023.103256.
- Fitri, M. A. and Rahkadima, Y. T. (2021) 'The effect of pretreatment process on lignocellulosic materials with a combination of microwaves and alkaline solvents on solid products', *Jurnal IPTEK*, 25(1). doi:

<https://doi.org/10.31284/j.ipitek.2021.v25i2.2355>.

Fitrihanah, L. *et al.* (2022) 'Distribution Mapping of Cadmium on Water and Soil in Rice Fields Around The Industrial Area of Sidoarjo Regency', in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, p. 012015. doi: 10.1088/1755-1315/1030/1/012015.

Golden, J. *et al.* (2021) 'Green Chemistry A Strong Driver of Innovation, Growth, and Business Opportunity', *Industrial Biotechnology*, 17(6), pp. 311–315. doi: 10.1089/ind.2021.29271.jgo.

Gómez-López, P. *et al.* (2020) 'Nanomaterials and catalysis for green chemistry', *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 24, pp. 48–55. doi: 10.1016/j.cogsc.2020.03.001.

Hashmi, S. S. *et al.* (2021) 'Potentials of phyto-fabricated nanoparticles as ecofriendly agents for photocatalytic degradation of toxic dyes and waste water treatment, risk assessment and probable mechanism', *Journal of the Indian Chemical Society*, 98(4), p. 100019. doi: 10.1016/j.jics.2021.100019.

Jain, D. *et al.* (2010) 'Poly-extremotolerant bacterium isolated from reverse osmosis reject: an implication toward waste water management', *Folia Microbiologica*, 55(6), pp. 614–620. doi: 10.1007/s12223-010-0100-z.

Jamesh, M.-I. *et al.* (2022) 'Fabrication of Earth-Abundant Electrocatalysts Based on Green-Chemistry Approaches to Achieve Efficient Alkaline Water Splitting—A Review', *Sustainability*, 14(24), p. 16359. doi: 10.3390/su142416359.

Jiang, P. *et al.* (2014) 'Environmentally Benign Solution for Recycling Electronic Waste Using the Principles of Green Chemistry', *Advanced Materials Research*, 878, pp. 406–412. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.878.406.

Kalleya, C. *et al.* (2023) 'Agricultural marketing research: A retrospective of domain and knowledge structure', *E3S Web of Conferences*. 426, p. 01071. doi: 10.1051/e3sconf/202342601071.

Kaya, M. and Tabak, A. (2020) 'Recycling of an Agricultural Bio-waste as a Novel Cellulose Aerogel: A Green Chemistry Study', *Journal of Polymers and the Environment*, 28(1), pp. 323–330. doi: 10.1007/s10924-019-01609-6.

Ksepko, E., Klimontko, J. and Kwiecinska, A. (2019) 'Industrial wastewater treatment wastes used as oxygen carriers in energy generation processes', *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 138(6), pp. 4247–4260. doi: 10.1007/s10973-019-08214-8.

Kurniawan, B. *et al.* (2023) 'Utilizing rattan waste of furniture industry in Desa Trangsan, Sukoharjo', in *AIP Conference Proceedings*, p. 030010. doi: 10.1063/5.0110236.

Kurniawan, Y. S. *et al.* (2021) 'Green Chemistry Influences in Organic Synthesis : a Review', *Journal of Multidisciplinary Applied Natural Science*, 1(1), pp. 1–12. doi: 10.47352/jmans.v1i1.2.

Maity, S. *et al.* (2022) 'Progress in Innovative Green Chemistry and Circular Economy in Textiles', in *Textile Dyes and Pigments*. Wiley, pp. 443–455. doi: 10.1002/9781119905332.ch23.

Maulana, F. I. and Pratama, F. C. (2021) 'The sustainable development goals in boon pring tourism village turen malang with swot methods', *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 739(1), p. 012051. doi: 10.1088/1755-1315/739/1/012051.

Najar, P. A. M. *et al.* (2020) 'Autogenous dissolution and nano-processing of iron in red mud: Green chemistry for value addition and recovery of materials', *Materials Today: Proceedings*, 26, pp. 69–76. doi: 10.1016/j.matpr.2019.05.378.

Nathaniela, T. C. *et al.* (2023) 'Manage Waste organic with Bioconversion Black Soldier Fly on Business

- Mega Maggot', *E3S Web of Conferences*. Edited by Widodo et al., 444, p. 04036. doi: 10.1051/e3sconf/202344404036.
- Novie, M. et al. (2021) 'East Java OPOP: Increasing the Growth of SMEs in Islamic Boarding Schools during the COVID-19 Pandemic', in *6th North American Conference on Industrial Engineering and Operations Management*. Monterrey: IEOM Society International.
- Omran, B. A. and Baek, K.-H. (2022) 'Valorization of agro-industrial biowaste to green nanomaterials for wastewater treatment: Approaching green chemistry and circular economy principles', *Journal of Environmental Management*, 311, p. 114806. doi: 10.1016/j.jenvman.2022.114806.
- Pramono, A. et al. (2022) 'Upcycling Fabric Waste for Home Decoration by Implementing Islamic Art Approach', *Journal of Islamic Architecture*, 7(2), pp. 253–261. doi: 10.18860/jia.v7i2.15795.
- Primadani, T. I. W. et al. (2023) 'Development of Dinoyo ceramic product variants with bamboo material to maintain business sustainability', in, p. 030011. doi: 10.1063/5.0111148.
- Purkait, A. and Hazra, D. K. (2020) 'Biodiesel as a carrier for pesticide formulations: a green chemistry approach', *International Journal of Pest Management*, 66(4), pp. 341–350. doi: 10.1080/09670874.2019.1649740.
- Rahmayanti, A. et al. (2022) 'Synthesis and Effectiveness of Snake Fruit (*Salacca zalacca*) Seed Charcoal Bio-Adsorbent in Reducing Remazol Brilliant Blue', in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, p. 012016. doi: 10.1088/1755-1315/1030/1/012016.
- Raj, A., Chowdhury, A. and Ali, S. W. (2022) 'Green chemistry: its opportunities and challenges in colouration and chemical finishing of textiles', *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 27, p. 100689. doi: 10.1016/j.scp.2022.100689.
- Sharma, N. and Sharma, S. K. (2022) 'Green Chemistry and Its Applications in Waste Management', in *Waste Technology for Emerging Economies*. Boca Raton: CRC Press, pp. 199–211. doi: 10.1201/9781003132349-9.
- Sheldon, R. A. and Brady, D. (2022) 'Green Chemistry, Biocatalysis, and the Chemical Industry of the Future', *ChemSusChem*, 15(9). doi: 10.1002/cssc.202102628.
- Srivastava, A. et al. (2021) 'Green chemistry: key to reducing waste and improving water quality', in *Handbook of Water Purity and Quality*. Elsevier, pp. 359–407. doi: 10.1016/B978-0-12-821057-4.00010-0.
- Srivastava, P. et al. (2022) 'Towards passive bioremediation of dye-bearing effluents using hydrous ferric oxide wastes: Mechanisms, products and microbiology', *Journal of Environmental Management*, 317, p. 115332. doi: 10.1016/j.jenvman.2022.115332.
- Stubbs, S., Yousaf, S. and Khan, I. (2022) 'A review on the synthesis of bio-based surfactants using green chemistry principles', *DARU Journal of Pharmaceutical Sciences*, 30(2), pp. 407–426. doi: 10.1007/s40199-022-00450-y.
- Widiyanti, A. et al. (2020) 'Pengelolaan Pengolahan Sampah Organik dan Lindi di TPST Desa Tulangan Sidoarjo', *Journal of Science and Social Development*, 3(2), pp. 17–20. Available at: <https://journal.unusida.ac.id/index.php/jssd/article/view/384>.
- Worthington, M. J. H., Kucera, R. L. and Chalker, J. M. (2017) 'Green chemistry and polymers made from sulfur', *Green Chemistry*, 19(12), pp. 2748–2761. doi: 10.1039/C7GC00014F.
- Yu, L. et al. (2020) 'Green chemistry: efficient acetalization of aldehydes with alcohols using the acid red 52 photocatalyst', *Environmental Chemistry Letters*, 18(4), pp. 1353–1359. doi: 10.1007/s10311-020-00994-y.