



Kajian Literatur Penerapan Kimia Hijau dan Tujuan Pembangunan Berkelanjutan dalam Pembelajaran Kimia

Egi Syahrah Anggraeni¹, Rizka Amalia Putri¹, Auriel Wafiq Tristania¹, Tiara Maharani¹,
Wirhanuddin Wirhanuddin¹, Agung Rahmadani^{1*}

¹Program Studi Sarjana Pendidikan Kimia, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas Mulawarman,
Samarinda 75123, Indonesia

*Corresponding author : agungrahmadani@fkip.unmul.ac.id

Abstrak

Penerapan konsep kimia hijau dan tujuan pembangunan berkelanjutan (*Sustainable Development Goals*) dalam pembelajaran kimia menjadi sangat penting untuk menghadapi tantangan global saat ini, seperti pemanasan global dan kerusakan lingkungan. Kajian literatur ini bertujuan untuk mengeksplorasi prinsip-prinsip kimia hijau yang dapat diintegrasikan ke dalam kurikulum pendidikan, sehingga meningkatkan pemahaman siswa tentang dampak kimia terhadap keberlanjutan. Metode yang digunakan dalam kajian ini adalah *narrative literature review* yang mengumpulkan dan menganalisis berbagai sumber literatur terkait penerapan kimia hijau dan SDGs dalam pendidikan. Hasil kajian menunjukkan bahwa integrasi prinsip-prinsip keberlanjutan dalam pembelajaran kimia tidak hanya mendorong praktik pendidikan yang inovatif dan interdisipliner, tetapi juga memungkinkan pendidik dan peserta didik untuk berkontribusi secara aktif dalam menciptakan solusi berkelanjutan. Dengan demikian, pengembangan kurikulum yang relevan sangat diperlukan untuk memastikan generasi mendatang lebih sadar akan isu-isu keberlanjutan.

Kata Kunci: Kimia hijau, pembelajaran kimia, tujuan pembangunan berkelanjutan

Abstract

The application of green chemistry concepts and sustainable development goals (SDGs) in chemistry learning is very important to face current global challenges, such as global warming and environmental damage. This literature review aims to explore the principles of green chemistry that can be integrated into the educational curriculum, thereby improving students' understanding of the impact of chemistry on sustainability. The method used in this study is a narrative literature review that collects and analyzes various sources of literature related to the application of green chemistry and SDGs in education. The results of the study indicate that the integration of sustainability principles in chemistry learning not only encourages innovative and interdisciplinary educational practices, but also allows educators and students to actively contribute to creating sustainable solutions. Thus, the development of a relevant curriculum is urgently needed to ensure that future generations are more aware of sustainability issues.

Keywords: Green chemistry, chemistry learning, sustainable development goals

1. PENDAHULUAN

Paradigma baru sangat diperlukan untuk menghadapi tantangan mendesak yang dihadapi dunia saat ini, seperti pemanasan global, penurunan kualitas lingkungan, dan krisis sumber daya alam. Dalam rangka memastikan bahwa gagasan pembangunan berkelanjutan dapat terwujud dan tidak terganggu bagi generasi mendatang, Perserikatan Bangsa-Bangsa (PBB) telah menetapkan 17 Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs) yang berfungsi sebagai panduan global untuk mencapai kesejahteraan sosial, ekonomi, dan lingkungan. Dalam konteks ini, pendidikan berperan krusial dalam menciptakan generasi yang tidak hanya memahami, tetapi juga menyadari dan menghargai pentingnya keberlanjutan, sehingga isu-isu terkait pembangunan berkelanjutan dapat diintegrasikan

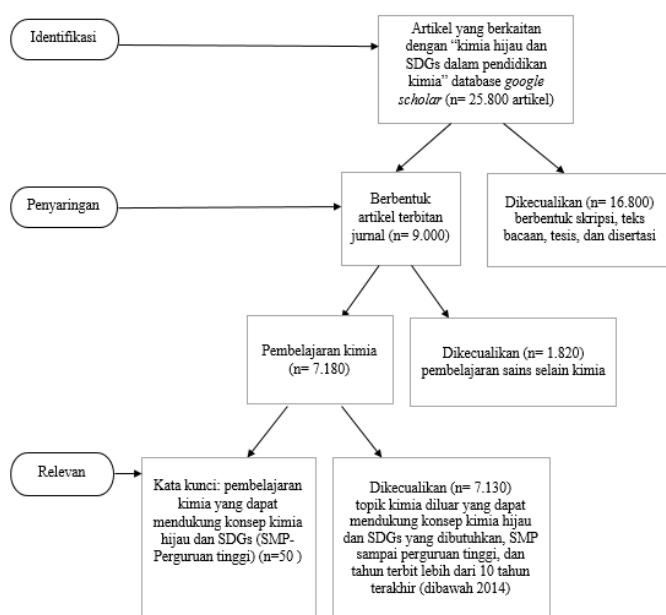
secara efektif ke dalam pembelajaran, khususnya dalam mata pelajaran kimia yang berperan strategis dalam pengembangan teknologi dan proses yang lebih ramah lingkungan (Dayrit & Enriquez, 2023).

Kimia yang mengedepankan konsep kimia hijau memiliki potensi besar untuk mendukung pencapaian SDGs dengan memberikan pemahaman tentang bagaimana ilmu kimia dapat dioptimalkan untuk mengatasi masalah lingkungan yang semakin kompleks (Paristiowati et al., 2022; Sari & Atun, 2023). Dengan konsep kimia hijau, produk dan proses kimia akan lebih ramah lingkungan, berkelanjutan, dan aman bagi kesehatan manusia, sehingga dapat berkontribusi secara signifikan terhadap pencapaian tujuan-tujuan global yang ditetapkan (Santosa et al., 2024). Dukungan dari organisasi internasional seperti *International Union of Pure and Applied Chemistry* (IUPAC), *American Chemical Society* (ACS), dan *Green Chemistry Institute* (GCI) menunjukkan bahwa gagasan ini telah mendapatkan perhatian dan pengakuan di tingkat global (Santos & Guidote, 2015). Dengan mengintegrasikan prinsip-prinsip kimia hijau dalam kurikulum pendidikan, siswa akan dibekali dengan keterampilan dan pengetahuan yang relevan untuk belajar bagaimana ilmu kimia dapat memberikan solusi inovatif terhadap tantangan lingkungan yang dihadapi saat ini dan di masa depan (Jusniar et al., 2023).

Integrasi kimia hijau dan SDGs dalam pembelajaran kimia tidak hanya memberikan kesempatan bagi peserta didik untuk mengaitkan teori dengan praktik, tetapi juga memperluas pengalaman belajar yang holistik dan interdisipliner, sehingga siswa dapat melihat hubungan konsep kimia hijau dan SDGs (Morales et al., 2024). Kajian literatur menunjukkan adanya berbagai konsep kimia yang dapat dihubungkan dengan prinsip kimia hijau dan SDGs, serta mendiskusikan metode pengajaran yang efektif untuk mencapai tujuan tersebut. Selain itu, tantangan yang mungkin dihadapi dalam penerapan kimia hijau dan SDGs dalam konteks pembelajaran akan membantu guru dan pendidik merancang strategi yang lebih baik dan lebih efektif dalam mendidik generasi mendatang, sehingga mereka dapat menghadapi tantangan global dengan cara yang berkelanjutan dan bertanggung jawab.

2. METODE

Kajian literatur ini menggunakan metode *Narrative Literature Review* yang bertujuan untuk memberikan gambaran umum tentang penerapan konsep kimia hijau dan SDGs dalam pembelajaran kimia. Pencarian artikel dilakukan melalui website menggunakan database *Google Scholar* dengan rentang tahun 2014-2024. Digunakan kriteria inklusi dan eksklusi untuk menyaring dan memasukkan penelitian yang relevan.



Gambar 1. Diagram alir strategi pencarian data

Pada tahap awal pencarian artikel ilmiah diperoleh 23.954 dengan menggunakan kata kunci “Integrasi Kimia Hijau dan SDGs di Pendidikan Kimia”, “*Integrated Green Chemistry and Sustainable Development Goal’s (SDGs) in Chemistry Education*”. Kemudian, untuk mempersempit hasil pencarian, dilakukan eksklusi terhadap 16.800 artikel yang tidak relevan. Dengan demikian, tersisa 9.000 artikel. Tahap berikutnya melibatkan penyaringan tambahan sehingga tersisa sebanyak 7.180 artikel. Setelah itu, artikel-artikel ini disaring kembali dengan kriteria inklusi dan diperoleh sebanyak 50 artikel yang paling relevan untuk dianalisis lebih lanjut.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Prinsip Kimia Hijau dan SDGs

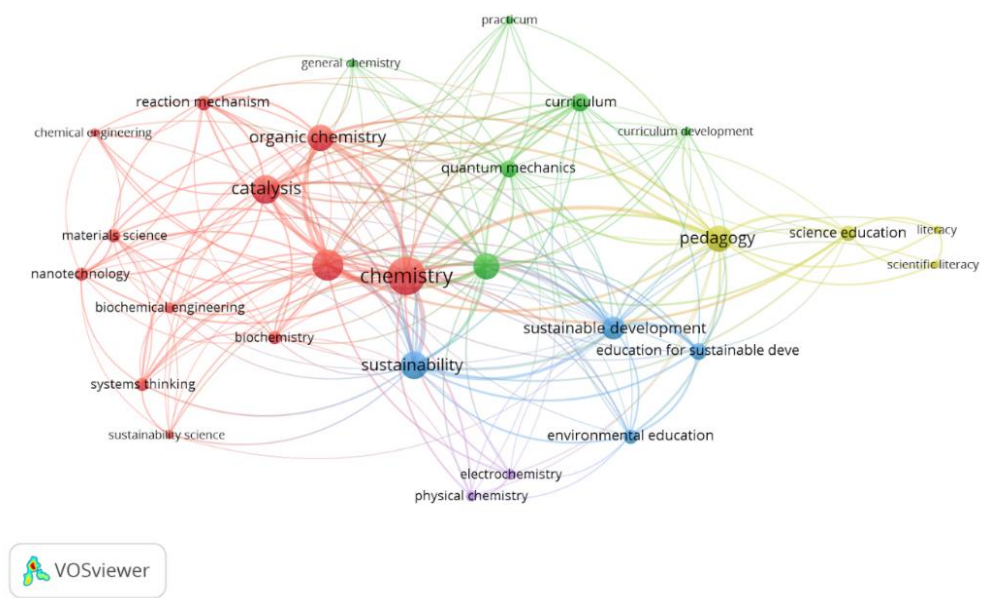
Kimia hijau adalah istilah yang mengacu pada penerapan kimia dengan cara mengoptimalkan dampak positifnya sekaligus meminimalkan dampak negatifnya (Mitarlis et al., 2023). Pada awalnya, konsep kimia hijau difokuskan pada pencegahan pencemaran. Oxford University Press menerbitkan 12 prinsip kimia hijau mencakup penggunaan bahan yang aman dan pencegahan limbah (Hariyadi et al., 2019). Menurut Junior et al. (2021) & Ramadevi et al. (2020) terdapat 12 prinsip kimia hijau yang meliputi 1) Mencegah timbulnya limbah; 2) Ekonomi atom; 3) Mendesain proses sintesis yang aman; 4) Desain bahan kimia yang lebih aman; 5) Pelarut dan faktor pembantu yang lebih aman; 6) Desain efisiensi energi; 7) Pemanfaatan sumber daya terbarukan; 8) Pengurangan derivatif yang tidak diperlukan; 9) Katalis; 10) Mendesain bahan kimia yang mudah terdegradasi; 11) Penggunaan metode analisis langsung untuk mengurangi polusi; dan 12) Meminimalisasi potensi kecelakaan. Dengan konsep ini, diharapkan dapat menangani masalah lingkungan seperti polusi dan pengelolaan limbah (Inayah et al., 2022; Azzajjad et al., 2024). Diantara 12 prinsip yang dapat diterapkan dalam pembelajaran yakni mencegah pemborosan, efisiensi energi, dan meminimalkan potensi bahaya (Mitarlis et al., 2023).

Sustainable Development Goals (SDGs) merupakan rencana global yang bertujuan mengatasi berbagai permasalahan sosial, ekonomi dan lingkungan (Aini et al., 2024). Prinsip SDGs menurut Crespo et al. (2017) diantaranya yaitu 1) Mengakhiri kemiskinan; 2) Mengakhiri kelaparan; 3) Menjamin kehidupan yang sehat dan kesejahteraan; 4) Memastikan pendidikan berkualitas; 5) Mencapai kesetaraan gender; 6) Memastikan ketersediaan air yang berkelanjutan; 7) Memastikan akses energi yang terjangkau; 8) Mempromosikan pertumbuhan ekonomi yang berkelanjutan; 9) Membangun infrastruktur yang tangguh; 10) Mengurangi kesenjangan; 11) Menjadikan kota dan pemukiman manusia aman; 12) Memastikan pola konsumsi dan produksi yang berkelanjutan; 13) Memerangi perubahan iklim dan dampaknya; 14) Melestarikan secara berkelanjutan lautan dan sumber daya kelautan; 15) Melindungi dan mendorong penggunaan ekosistem daratan yang berkelanjutan; 16) Mempromosikan masyarakat yang damai untuk pembangunan berkelanjutan; 17) Kemitraan Global untuk Pembangunan Berkelanjutan.

3.2 Konsep kimia yang mendukung penerapan kimia hijau dan SDGs di Pembelajaran Kimia

Dua belas prinsip kimia hijau adalah salah satu aturan yang memungkinkan pengembangan kimia dengan cara yang lebih berkelanjutan (Hamidah et al., 2017). Kimia memiliki peran penting dalam mempromosikan keberlanjutan melalui ide-ide kimia hijau untuk mendapatkan pendidikan yang berkelanjutan (Sari & Atun, 2023). Dalam penerapan kedua konsep tersebut, perlu memahami bahwa materi apa yang dapat dimasukkan dalam konsep kimia hijau dan SDGs.

Sajian statistik terkait kata kunci untuk penelitian kimia hijau dan SDGs dalam pembelajaran kimia diolah menggunakan software VOSviewer. Hasil analisis menunjukkan bahwa pada bidang penelitian kimia hijau dan SDGs pembelajaran kimia, kata kunci paling banyak digunakan yaitu *chemistry*, *catalyst*, dan *organic chemistry*. Dari data tersebut diketahui bahwa kimia hijau dan SDGs terikat ke ketiga kata tersebut. Adapun kata kunci *literacy*, *scientific literacy*, *practicum* ditunjukkan paling sedikit, sehingga menunjukkan potensial untuk penelitian lebih lanjut dan pengembangan kebijakan dalam domain ini. Adapun gambar statistik kata kunci sebagai berikut:



Gambar 2. Statistik kata kunci

Dimasukkannya konten kimia hijau dalam kurikulum memastikan siswa memiliki kesempatan untuk mempelajari bidang ini secara bermakna dalam pelestarian lingkungan, sejalan dengan SDGs (Morales et al., 2024). Pengaplikasian kedua konsep ini digunakan hingga perguruan tinggi. Dengan pembangunan berkelanjutan, memastikan bahwa masyarakat dapat hidup dengan sejahtera baik sekarang maupun di masa depan. Sebagai upaya mendukung gagasan ini, pendidik telah memodifikasinya ke dalam salah satu pokok bahasan pembelajaran kimia.

3.2.1 Tingkat Sekolah Menengah

Penerapan kimia hijau telah berkembang di sekolah menengah. Kimia hijau akan mengarah pada lebih sedikitnya penggunaan bahan dan proses yang berbahaya untuk mencapai masyarakat yang sehat dan berkelanjutan. Pemberian konsep ini sedini mungkin, sangat penting untuk membawa perubahan jangka panjang dalam pembelajaran kimia (Cannon et al., 2023).

Tabel 1. Integrasi Kimia Hijau dan SDGs dalam Pembelajaran Kimia Sekolah Menengah

Materi	Prinsip Kimia Hijau	Prinsip SDGs	Referensi
Asam Basa	➤ Mencegah timbulnya limbah ➤ Desain bahan kimia yang lebih aman ➤ Pelarut dan faktor pembantu yang lebih aman ➤ Pemanfaatan sumber daya terbarukan	➤ Memastikan pendidikan berkualitas ➤ Memastikan akses energi yang terjangkau ➤ Memastikan pola konsumsi dan produksi yang berkelanjutan ➤ Memerangi perubahan iklim dan dampaknya	Koulougliotis et al., 2024; Olanrewaju & Adeosun, 2023; Rahmawati et al., 2022; Listyarini et al., 2019

Materi	Prinsip Kimia Hijau	Prinsip SDGs	Referensi
	➤ Meminimalisasi potensi kecelakaan	➤ Melestarikan secara berkelanjutan lautan dan sumber daya kelautan ➤ Melindungi dan mendorong penggunaan ekosistem daratan yang berkelanjutan	
Redoks	➤ Mencegah timbulnya limbah ➤ Desain bahan kimia yang lebih aman ➤ Pelarut dan faktor pembantu yang lebih aman ➤ Pemanfaatan sumber daya terbarukan ➤ Meminimalisasi potensi kecelakaan	➤ Memastikan pendidikan berkualitas ➤ Memastikan akses energi yang terjangkau ➤ Memastikan pola konsumsi dan produksi yang berkelanjutan	Rahmawati et al., 2022
Elektrokimia	➤ Mencegah timbulnya limbah ➤ Desain efisiensi energi	➤ Memastikan pendidikan berkualitas ➤ Memastikan akses energi yang terjangkau ➤ Memastikan pola konsumsi dan produksi yang berkelanjutan	Rahmawati et al., 2022; Listyarini et al., 2019; Purwanti et al., 2023
Pemisahan Campuran	➤ Mencegah timbulnya limbah ➤ Desain bahan kimia yang lebih aman ➤ Penggunaan metode analisis langsung untuk mengurangi polusi	➤ Memastikan pendidikan berkualitas ➤ Memastikan pola konsumsi dan produksi yang berkelanjutan ➤ Memerangi perubahan iklim dan dampaknya	Hariyadi et al., 2019
Termodinamika	➤ Mencegah timbulnya limbah ➤ Desain bahan kimia yang lebih aman ➤ Pelarut dan faktor pembantu yang lebih aman	➤ Memastikan pendidikan berkualitas ➤ Memastikan pola konsumsi dan produksi yang berkelanjutan ➤ Memerangi perubahan iklim dan dampaknya	Cannon et al., 2023; Aswirna et al., 2022
Konsep Mol	➤ Mencegah timbulnya limbah ➤ Pelarut dan faktor pembantu yang lebih aman	➤ Memastikan pendidikan berkualitas ➤ Memastikan pola konsumsi dan produksi yang berkelanjutan ➤ Memerangi perubahan iklim dan dampaknya	Aini, 2024

Materi	Prinsip Kimia Hijau	Prinsip SDGs	Referensi
Stoikiometri	➤ Mencegah timbulnya limbah ➤ Desain bahan kimia yang lebih aman ➤ Pelarut dan faktor pembantu yang lebih aman ➤ Desain efisiensi energi ➤ Pemanfaatan sumber daya terbarukan ➤ Penggunaan metode analisis langsung untuk mengurangi polusi ➤ Meminimalisasi potensi kecelakaan	➤ Memastikan pendidikan berkualitas ➤ Memastikan pola konsumsi dan produksi yang berkelanjutan	Jusniar et al., 2023; Yuniar et al., 2019
Laju Reaksi	➤ Mencegah timbulnya limbah ➤ Ekonomi atom ➤ Katalis ➤ Mendesain bahan kimia yang mudah terdegradasi	➤ Memastikan pendidikan berkualitas	Fibonacci et al., 2020
Kimia Organik	➤ Mencegah timbulnya limbah ➤ Desain efisiensi energi ➤ Pemanfaatan sumber daya terbarukan ➤ Mendesain bahan kimia yang mudah terdegradasi	➤ Memastikan pendidikan berkualitas ➤ Memastikan pola konsumsi dan produksi yang berkelanjutan ➤ Memerangi perubahan iklim dan dampaknya	Koulougliotis et al., 2024
Sistem Periodik Unsur, Struktur, dan Ikatan Kimia	➤ Mencegah timbulnya limbah ➤ Pelarut dan faktor pembantu yang lebih aman ➤ Pemanfaatan sumber daya terbarukan ➤ Meminimalisasi potensi kecelakaan	➤ Memastikan pendidikan berkualitas	Koulougliotis et al., 2024; Jusniar et al., 2023

Konsep kimia hijau pada materi asam basa diilustrasikan dengan memasukkan penggunaan *Rosa sp.* sebagai indikator alami dalam praktikum kimia sehingga siswa menjadi lebih terlibat tentang masalah ilmiah yang berkaitan dengan pembangunan berkelanjutan (Olanrewaju & Adeosun, 2023). Kedua konsep tersebut juga dapat dimasukkan pada materi polimer, larutan penyangga, asam basa, dan reaksi redoks (Rahmawati et al., 2022). Pada materi stoikiometri, direalisasikan dalam bentuk pengembangan petunjuk praktikum berbasis *green chemistry* sebagai langkah menuju pendidikan untuk pembangunan berkelanjutan (Yuniar et al., 2019). Penerapan pada materi reaksi kimia dilakukan dengan mengimplementasikan bersama media pembelajaran *Chemstro* melalui konten pembangunan berkelanjutan untuk mengajarkan cara memecahkan masalah lingkungan dengan pemahaman konsep kimia hijau (Fibonacci et al., 2020). Melalui kedua variasi tersebut, diharapkan pemahaman akan kimia hijau untuk mendukung SDGs meningkat. Penerapan prinsip kimia hijau dapat dilakukan dengan praktikum kimia skala kecil

untuk memperkenalkan kimia hijau lebih luas dan dapat membantu para pendidik dan siswa agar mencapai tujuan pembelajaran (Listyarini et al., 2019). Integrasi konsep kimia hijau dan SDGs dapat dimulai dengan memasukkan kedua prinsip tersebut ke dalam materi kimia untuk mewujudkan pemahaman terhadap masalah nyata. Secara keseluruhan, penerapan konsep kimia hijau dalam pembelajaran dapat meningkatkan kontribusi siswa dalam bentuk kepedulian kepada lingkungan sehingga meningkatkan kesadaran akan pentingnya prinsip keberlanjutan.

3.2.2 Tingkat Perguruan Tinggi

Kimia hijau dan SDGs banyak diterapkan dalam kegiatan praktikum seperti pada mata kuliah pendidikan kimia untuk berkelanjutan. Mata kuliah ini mengkaji bagaimana pendidikan kimia berkontribusi dalam menyelesaikan masalah global (Widayanti & Rahmawati, 2022). Beberapa prinsip kimia hijau dan keberlanjutan terintegrasi secara menyeluruh dalam peraturan pusat universitas (D'eon & Silverman, 2023). Salah satu contoh penerapan konsep kimia hijau yang mendukung SDGs melalui praktikum kinetika kimia berbasis *green chemistry*, yang menggabungkan prinsip kimia hijau dengan paradigma pendidikan SDGs (Paristiowati et al., 2019). Berikut ini mata kuliah yang dapat menerapkan kimia hijau dan SDGs seperti pada Tabel 2.

Tabel 2. Integrasi Kimia Hijau dan SDGs dalam Pembelajaran Kimia Perguruan Tinggi

Mata Kuliah	Prinsip Kimia Hijau	Prinsip SDGs	Referensi
Praktikum Kinetika Kimia	➤ Mencegah timbulnya limbah ➤ Desain bahan kimia yang lebih aman ➤ Desain bahan kimia yang lebih aman	➤ Memastikan pendidikan berkualitas ➤ Memerangi perubahan iklim dan dampaknya	Paristiowati et al., 2019
Kimia Dasar	➤ Mencegah timbulnya limbah ➤ Pelarut dan faktor pembantu yang lebih aman ➤ Desain efisiensi energi ➤ Pemanfaatan sumber daya terbarukan ➤ Meminimalisasi potensi kecelakaan	➤ Memastikan pendidikan berkualitas ➤ Memastikan ketersediaan air yang berkelanjutan ➤ Memastikan akses energi yang terjangkau ➤ Memastikan pola konsumsi dan produksi yang berkelanjutan ➤ Memerangi perubahan iklim dan dampaknya ➤ Kemitraan Global untuk Pembangunan Berkelanjutan	Mitarlis et al., 2022; Widyastuti et al., 2022; Idrus et al., 2021
Kimia Organik	➤ Mencegah timbulnya limbah ➤ Mendesain proses sintesis yang aman ➤ Pelarut dan faktor pembantu yang lebih aman	➤ Memastikan akses energi yang terjangkau	Sharma et al., 2019; Hamidah et al., 2017
Stoikiometri	➤ Ekonomi atom	➤ Memastikan akses energi yang terjangkau ➤ Memerangi perubahan iklim dan dampaknya	D'eon & Silverman, 2023

Mata Kuliah	Prinsip Kimia Hijau	Prinsip SDGs	Referensi
Pendidikan Kimia untuk Berkelanjutan	➤ Mencegah timbulnya limbah ➤ Ekonomi atom ➤ Mendesain proses sintesis yang aman ➤ Desain bahan kimia yang lebih aman ➤ Pelarut dan faktor pembantu yang lebih aman ➤ Desain efisiensi energi ➤ Pemanfaatan sumber daya terbarukan ➤ Pengurangan derivatif yang tidak diperlukan ➤ Katalis ➤ Mendesain bahan kimia yang mudah terdegradasi ➤ Penggunaan metode analisis langsung untuk mengurangi polusi ➤ Meminimalisasi potensi kecelakaan	➤ Memastikan pendidikan berkualitas	Widayanti & Rahmawati, 2022

3.3 Strategi dan Metode Pengintegrasian SDGs Berbasis Kimia Hijau dalam Pembelajaran Kimia

Strategi pengintegrasian SDGs berbasis kimia hijau dalam pembelajaran kimia bertujuan untuk menciptakan pendekatan pembelajaran yang sejalan dengan prinsip keberlanjutan. Dari literatur yang diperoleh, pengintegrasian SDGs dalam pembelajaran kimia dapat dilakukan melalui beberapa pendekatan strategis. Masalah keberlanjutan lingkungan dalam konteks pembelajaran kimia berarti mengajarkan konsep kimia hijau dan kimia keberlanjutan yang membantu siswa memahami dampak kimia terhadap lingkungan serta dapat meminimalkan dampak negatif dari aktivitas tersebut (Souza et al., 2024). Contohnya pada integrasi prinsip kimia hijau di kurikulum dan laboratorium penting untuk mendorong praktik kimia berkelanjutan (Madi, 2024). Pembelajaran kimia hijau dan SDGs juga memberikan pengalaman belajar yang kontekstual dan interdisipliner. Pembelajaran dengan pendekatan interdisipliner dapat dikolaborasikan dengan model pembelajaran *problem based learning* (Mahaffy et al., 2019), serta mengkolaborasikannya dengan pendekatan berpikir sistemik (Putri, 2019; Constable, 2021). Pendekatan berpikir sistemik dapat difasilitasi dengan permainan dalam kimia hijau (Miller et al., 2019).

Dalam memudahkan integrasi kimia hijau dan pembangunan berkelanjutan di pembelajaran kimia dapat dilakukan pengembangan modul pembelajaran berkelanjutan. Modul tersebut menggabungkan konsep kimia hijau dan SDGs dengan latihan praktis di kelas dan laboratorium yang dikembangkan oleh institusi seperti *American Chemical Society (ACS) Green Chemistry Institute* dan organisasi *Beyond Benign* (Zuin et al., 2021). Metode strategis selanjutnya dengan pengembangan kompetensi inti yang mencakup evaluasi, efisiensi proses, limbah, dan keberlanjutan produk. Di Eropa, pengembangan kompetensi inti diintegrasikan melalui kemitraan antara akademisi dan industri, memungkinkan pengembangan kurikulum yang sesuai dengan praktik industri berkelanjutan (Etzkorn & Ferguson, 2023).

3.4 Tantangan dan Solusi

Tantangan terbesar terletak pada sulitnya menghubungkan konsep dasar kimia dengan prinsip-prinsip keberlanjutan. Sebagian besar materi dalam kurikulum kimia berfokus pada pemahaman mekanisme dan teori (Juntunen & Aksela, 2014; Marques et al., 2020). Selain itu, integrasinya dalam kurikulum pendidikan masih minim, banyak institusi yang belum memasukkan prinsip-prinsip berkelanjutan (Júnior et al., 2024; Hoffman & Dicks, 2023; Hussein & Ahmad, 2021). Diperlukan metode pembelajaran agar siswa dapat mengaitkan kimia dengan masalah lingkungan (Aini, 2024; Guo et al., 2021). Tantangan lainnya adalah kurangnya akses laboratorium yang memadai, serta kebijakan yang belum sepenuhnya mendukung kimia berkelanjutan (Santos & Guidote, 2015). Oleh karena itu, dukungan dari pemerintah dan lembaga pendidikan diperlukan untuk menyediakan sumber daya yang diperlukan agar melaksanakan integrasi ini secara efektif (Ganesha et al., 2021; MacKellar et al., 2020).

Untuk mengatasi tantangan, pertama, kurikulum harus dirancang untuk mengaitkan prinsip-prinsip kimia hijau dengan isu keberlanjutan, seperti dampak bahan kimia terhadap lingkungan (Adnyana et al., 2023). Kedua, pelatihan bagi pendidik perlu diadakan secara rutin untuk meningkatkan pemahaman. Pendekatan interdisipliner juga ditekankan menggabungkan aspek sosial dan ekonomi untuk memahami implikasi penggunaan bahan kimia dalam konteks keberlanjutan (Sulochana et al., 2024). Terakhir, meningkatkan kesadaran publik tentang pentingnya kimia hijau diharapkan dapat mempengaruhi perilaku masyarakat dalam penggunaan produk kimia, mendukung pencapaian SDGs yang berkaitan dengan kesehatan dan kesejahteraan masyarakat (Juntunen & Aksela., 2014; Zuin et al., 2021).

4. SIMPULAN

Penerapan kimia hijau dan Tujuan Pembangunan Berkelanjutan atau *Sustainable Development Goals* (SDGs) dalam pembelajaran kimia merupakan langkah yang sangat penting. Mengintegrasikan kedua konsep tersebut dalam pembelajaran kimia sangat penting untuk meningkatkan kesadaran akan isu-isu lingkungan untuk mendukung SDGs. Diperlukan pengembangan kurikulum yang relevan dan pendekatan interdisipliner, sehingga memahami dampak kimia terhadap keberlanjutan dan berkontribusi pada solusi praktis untuk tantangan global. Penerapan prinsip kimia hijau tidak hanya akan meningkatkan kesadaran lingkungan, tetapi juga mendorong praktik pendidikan yang mendukung keberlanjutan di semua tingkatan.

DAFTAR PUSTAKA

- Adnyana, M. D. M., Mahendra, K. A., & Raza, S. M. (2023). The Importance of Green Education in Indonesia: An Analysis of Opportunities and Challenges. *Jurnal Education Specialist*, 1(2): 61-68. <https://doi.org/10.62672/joease.v1i2.14>
- Aini, H. N. (2024). Inovasi Pembelajaran Kimia Berorientasi SDGs Pada Materi Konsep Mol untuk Meningkatkan Kemampuan Berpikir Sistem. *Jurnal Riset Pembelajaran Kimia*, 9(2), 56-62. <https://dx.doi.org/10.21831/jrpk.v9i2.20640>
- Aswirna, P., Kiswanda, V., Nurhasnah., & Fahmi, R. (2022). Implementation of STEM E-Module with SDGs Principle to Improve Science Literacy and Environment-friendly Attitude in Terms of Gender. *Jurnal Tadris Kimiya*, 7(1), 64-77. <https://dx.doi.org/10.15575/jtk.v7i1.16599>
- Azzajjad, M. F., Ahmar, D. S. & Kilo, A. K. (2024). Pemahaman Mahasiswa tentang Keberlanjutan dalam Kimia: Kajian Pengembangan pada Proyek Green Chemistry. *Jambura Journal of Educational Chemistry*, 1(6), 11-20. <https://doi.org/10.37905/jjec.v6i1.22386>
- Cannon, A. S, Anderson, K. R., Enright, M. C., Kleinsasser, D. G., Klotz, A. R., O'Neil, N. J & Tucker, L. J. (2023). Green Chemistry Teacher Professional Development in New York State

- High Schools: A Model for Advancing Green Chemistry. *J. Chem. Educ.*, 100(6), 2224-2232. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.2c01173>
- Constable, D. J. C. (2021). Green and Sustainable Chemistry the Case for a Systems-based, Interdisciplinary Approach. *iScience*, 24(12), 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2021.103489>
- Crespo, B., Míguez-Álvarez, C., Arce, M. E., Cuevas, M., & Míguez, J. L. (2017). The Sustainable Development Goals: An Experience on Higher Education. *Sustainability*, 9(8), 1-15. <http://dx.doi.org/10.3390/su9081353>
- Dayrit, F. M. & Enriquez, E. P. (2023). Teaching Sustainability in Science: the Case for Chemistry. *Philippine Journal of Science*, 152(3), 9-11. <https://doi.org/10.56899/152.03.ED>
- D'eon, J. & Silverman, J. R. (2023). Using Systems Thinking to Connect Green Principles and United Nations Sustainable Development Goals in a Reaction Stoichiometry Module. *Green Chemistry Letters and Reviews*, 16(1), 1-9. <https://doi.org/10.1080/17518253.2023.2185109>
- Etzkorn, F. A & Ferguson, J. L. (2022). Integrating Green Chemistry into Chemistry Education. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2(62), 1-6. <https://doi.org/10.1002/anie.202209768>
- Fibonacci, A., Azizati, Z., dan Wahyudi, T. (2020). Development of Education for Sustainable Development (ESD) Based Chemsdro Mobile Learning for Indonesia Junior High School : Rate of Reaction. *Jurnal Tadris Kimiya*, 5(1), 26-34. <http://dx.doi.org/10.15575/jtk.v5i1.5908>
- Ganesha, K. N., Zhang, D. Q., Miller, S. J., Rossen, K., Chirik, P. J., Kozlowski, M. C., Zimmerman, J. B., Brooks, B. W., Philip, E., Allen, D. T., & Voutchkova-Kostal, A. M. (2021). Green Chemistry: A Framework for a Sustainable Future. *ACS Publications*, 6(25), 1801-1805. <https://dx.doi.org/10.1021/acs.orglett.1c01906>
- Guo, Z., Wang, A., Wang, W. Y., Zhao, Y., & Chiang, P. (2021). Implementing Green Chemistry Principles for Circular Economy Towards Sustainable Development Goals. *Chemical Engineering Transactions*, 17(88), 955-960. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136998>
- Hamidah, N., Prabawati, S. Y., Fajriati, I., & Eilks, I. (2017). Incorporating Sustainability in Higher Chemistry Education in Indonesia through Green Chemistry: Inspirations by Inquiring the Practice in a German University. *International Journal of Physics and Chemistry Education*, 9(1), 1-7. <http://dx.doi.org/10.12973/ijpce/79220>
- Hariyadi, D., Enawaty, E., & Lestari, I. (2019). Pengaruh Metode Praktikum Green Chemistry Terhadap Hasil Belajar Siswa Kelas VII SMP Negeri 08 Singkawang pada Materi Pemisahan Campuran. *Jurnal Pendidikan dan Pembelajaran Khatulistiwa*, 8(3), 1-7.
- Hoffman, K. C. & Dicks, A. P. (2023). Incorporating the United Nations Sustainable Development Goals and green chemistry principles into high school curricula. *Green Chemistry Letters and Reviews*, 16(1), 1-8. <https://doi.org/10.1080/17518253.2023.2185108>
- Hussein, A. A. & Ahmed, S. D. (2021). Awareness of the principles of green chemistry among middle school teachers. *Turkish Journal of Computer and Mathematics Education*, 12(7), 475-483.
- Idrus, S. W. A., Mutiah, M., Rahmawati, R., Junaedi, E., & Anwa, Y. A. S. (2021). Sosialisasi Prinsip Green Chemistry untuk Meningkatkan Kesadaran Akan Bahaya Limbah Kimia Terhadap Lingkungan pada Mahasiswa Prodi Pendidikan Kimia FKIP UNRAM. *Jurnal Pengabdian Masyarakat Sains Indonesia*, 3(2), 127-133. <https://doi.org/10.29303/jpmsi.v3i2.135>
- Inayah, S., Dasna, I. W. & Habiddin. (2022). Implementasi Green Chemistry Dalam Pembelajaran Kimia: Literatur Review. *Hydrogen: Jurnal Kependidikan Kimia*, 1(10), 42-49. <https://doi.org/10.33394/hjkk.v10i1.4611>

- Junior, C. A. S., Morais, C., Jesus, D. P., & Junior, G. G. (2024). The Role of the Periodic Table of the Elements of Green and Sustainable Chemistry in a High School Educational Context. *MDPI*, 16(6), 2-22. <http://dx.doi.org/10.3390/su16062504>
- Juntunen, M. K. & Aksela, M. K. (2014). Education for Sustainable Development in Chemistry–Challenges, Possibilities and Pedagogical Models in Finland and Elsewhere. *Chem. Educ. Res. Pract*, 15(1), 488-500. <https://doi.org/10.1039/C4RP00128A>
- Juntunen, M. K. & Aksela, M. K. (2014). Improving students' argumentation skills through a product life-cycle analysis project in chemistry education. *Chem. Educ. Res. Pract*, 15(4), 639-649. <https://doi.org/10.1039/C4RP00068D>
- Jusniar, Syamsidah, & Auliah, A. (2023). Teacher's and Student's Perceptions of Green Chemistry and its Principles in Chemistry Learning in High Schools. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*, 9(10), 7924-7934. <http://dx.doi.org/10.29303/jppipa.v9i10.4756>
- Koulougliotis, D., Paschalido, K., & Salta, K. (2024). Secondary School Students' Engagement with Environmental Issues via Teaching Approaches Inspired by Green Chemistry. *Sustainability*, 16(16), 1-17. <http://dx.doi.org/10.3390/su16167052>
- Listyarini, R. V., Pamenang, F. D. N., Harta, J., Wijayanti, L. W., Asy'ari, M. & Lee, W. (2019). The Integration of Green Chemistry Principles into Small Scale Chemistry Practicum for Senior High School Students. *Jurnal Pendidikan IPA Indonesia*, 8(3), 371-378. <https://doi.org/10.15294/jpii.v8i3.19250>
- MacKellar, J. J., Constable, D. J. C., Kirchhoff, M. M., Hutchison, J. E., & Beckman, E. (2020). Toward a Green and Sustainable Chemistry Education Road Map. *J. Chem. Educ*, 97(8), 1-10. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.0c00288>
- Madi, S. E. M. (2024). Cultivating Sustainable Practices: Integrating Green Chemistry in the Course of Chemistry and Laboratories Curriculum. *Afro-Asian Journal of Scientific Research*, 2(2), 91-102.
- Mahaffy, P. G., Matlin, S. A., Whalen, J. M., & Holme, T. H. (2019). Integrating the Molecular Basis of Sustainability into General Chemistry through Systems Thinking. *J. Chem. Educ*, 96(12), 2730-2741. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.9b00390>
- Marques, C. A., Marcelino, L. V., Dias, D. S. É., Rüntzel, P. L., Souza, L. C. A. B., & Machado, A. (2020). Green Chemistry Teaching for Sustainability in Papers Published by The Journal of Chemical Education. *Quim. Nova*, 43(10), 1510-1521. <http://dx.doi.org/10.21577/0100-4042.20170612>
- Miller, J. L., Wentzel, M. T., Clark, J. H., & Hurst, G. A. (2019). Green Machine: A Card Game Introducing Students to Systems Thinking in Green Chemistry by Strategizing the Creation of a Recycling Plant. *J. Chem. Educ*, 96(12), 3006-3013. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.9b00278>
- Mitarlis, Azizah, U., & Yonata, B. (2022). Adaptation of Basic Chemistry Learning with Green Chemistry Oriented. *Jurnal Pembelajaran Kimia*, 7(2), 80-89. <http://dx.doi.org/10.17977/um026v7i22022p080>
- Mitarlis, Azizah, U., & Yonata, B. (2023). The Integration of Chemistry Principles in Basic Chemistry Learning to Support Achievement of Sustainable Development Goals (SDGs) Through Education. *Journal of Technology and Science Education*, 13(1), 233-254. <https://doi.org/10.3926/jotse.1892>

- Morales, R. S., Lopez, P. S., Lopez, P. S., & Perez, M. A. D. L. (2024). Green Chemistry and Its Impact on the Transition towards Sustainable Chemistry: A Systematic Review. *MDPI*, 16(15), 1-14. <https://doi.org/10.3390/su16156526>
- Olanrewaju, A. O. & Odeosun, N. O. (2023). Application of Principles and Tools in Green Chemistry to Education Using Rose Flower Extract as Acid-Base Indicator. *J. Chem. Soc*, 48(1), 45-50. <http://dx.doi.org/10.46602/jcsn.v48i1.847>
- Paristiowati, M., Zulmanelis., & Nurhadi, M. F. (2019). Green Chemistry-Based Experiment as the Implementation of Sustainable Development Values. *Jurnal Tadris Kimiya*, 4(1), 11-20. <http://dx.doi.org/10.15575/jtk.v4i1.3566>
- Paristiowati, M., Rahmawati, Y., Fitriani, E., Satrio, J. A., & Hasibuan, N. A. P. (2022). Developing preservice chemistry teachers' engagement with sustainability education through an online, project-based learning summer course program. *Sustainability*, 14(3), 1-18. <http://dx.doi.org/10.3390/su14031783>
- Purwanti, Hernani, & Khoerunnisa, F. (2023). Profil Literasi Sains Peserta Didik SMK pada Penerapan Pembelajaran Proyek Electroplating Berbasis Green Chemistry. *Orbital: Jurnal Pendidikan Kimia*, 7(1), 1-10. <http://dx.doi.org/10.19109/ojpk.v7i1.16839>
- Putri, A. C. (2019). Pengaplikasian Prinsip-Prinsip Green Chemistry dalam Pelaksanaan Pembelajaran Kimia sebagai Pendekatan untuk Pencegahan Pencemaran Akibat Bahan-Bahan Kimia dalam Kegiatan Praktikum di Laboratorium. *Journal of Creativity Student*, 2(2), 67-73. <http://dx.doi.org/10.15294/jcs.v2i2.14585>
- Rahmawati, Y., Taylor, E., Taylor, P. C., Ridwan, A., & Mardiah, A. (2022). Students' Engagement in Education as Sustainability: Implementing an Ethical Dilemma-STEAM Teaching Model in Chemistry Learning. *Sustainability*, 14(6), 1-15. <http://dx.doi.org/10.3390/su14063554>
- Ramadevi, Ramakrishna, & Malleswari. (2020). Green Chemistry Plays Key Role in Eco-Friendly, Sustainable Development. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 7(4), 4024-4028.
- Santos, R. G. & Guidote, A. V. M. G. Jr. (2015). The green chemistry and Filipino approach to high school experiments in Saint Paul College Pasig. *International Journal of Curriculum and Instruction*, 7(2), 51-57.
- Santosa, N. K. Y., Sulistyowati, L., & Aji, S. S. (2024). Penerapan Kimia Hijau dan Pengetahuan Lingkungan serta Keterkaitannya dengan Perilaku Peduli Lingkungan. *Jurnal Teknologi Lingkungan Lahan Basah*, 12(2), 351-360. <http://dx.doi.org/10.26418/jtlb.v12i2.76895>
- Sari, W. P. P. & Atun, S. (2023). Green Chemistry into Learning Process. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*, 9(10), 921-928. <http://dx.doi.org/10.29303/jppipa.v9i10.5012>
- Sharma, R. K., Yadav, S., Gupta, R., & Arora, G. (2019). Synthesis of Magnetic Nanoparticles Using Potato Extract for Dye Degradation: A Green Chemistry Experiment. *J. Chem. Educ*, 96(12), 1-9. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.9b00384>
- Souza, A. S. D., Ferreira, P. G., Jesus, I. S. D., Carvalho, A. S. D., Futuro, D. O., & Ferreira, V. F. (2024). Sustainability, Sustainable Development, Sustainable Chemistry, and Green Chemistry: Parallels and Interconnections. *SciELO Brazil*, 47(9), 1-8. http://dx.doi.org/10.1007/978-981-16-3746-9_5
- Sulochana, M., Babu, R., Thakur, S., Mahalle, P. R., Jorapur, Y., & Nakkella, A. K. (2024). Green Chemistry Innovations for Sustainable Development. *African Journal of Biological Sciences*, 6(9), 5524-5541. <https://doi.org/10.48047/AFJBS.6.9.2024.5524-5541>

- Widayanti, Y. & Rahmawati, S. Preliminary Knowledge Analysis of First-Year Undergraduate Student at UIN Walisongo on Green Chemistry Concept. *Jurnal Pendidikan dan Pembelajaran Kimia*, 11(1), 138-144. <https://doi.org/10.23960/jppk.v.il.2022.13>
- Widyastuti, S., Yusrina, N., Fadhilah, S. G., & Khunur, M. M. (2022). Penerapan Konsep Kurikulum Hijau dan Kimia Hijau dalam Desain Praktikum dan Pengolahan Limbah Laboratorium Kimia. *The Indonesian Green Technology Journal*, 11(1), 21-26. <https://doi.org/10.21776/ub.igtj.2022.011.01.03>
- Yuniar, S. A., Zammi, M. & Suryandari, E. T. (2019). Pengembangan Petunjuk Praktikum Berbasis Green Chemistry Pada Materi Stoikiometri Kelas X. *Jurnal of Educational Chemistry*, 1(2), 51-61. <https://doi.org/10.21580/jec.2019.1.2.4235>
- Zuin, V. G., Eilks, I., Elschami, M., & Kummerer, K. (2021). Education in Green Chemistry and in Sustainable Chemistry: Perspectives Towards Sustainability. *Royal Society of Chemistry*, 23(4), 1594-1608. <https://doi.org/10.1039/D0GC03313H>