

**INTEGRASI GREEN CHEMISTRY DALAM KURIKULUM
PENDIDIKAN TINGGI: TINJAUAN PRAKTIK INTERNASIONAL DAN
RELEVANSINYA DI INDONESIA**

*Integration of Green Chemistry into Higher Education Curricula: An International Review
and Its Relevance to the Indonesian Context*

**Sri Magfirah HS^{1*}, Herlina Sattuang², Riska Wulandari³, Nur Aeni⁴, Azmalaeni Rifkha
Ansyarif⁵**

Universitas Syekh Yusuf Al Makassar Gowa^{1,4,5}, Universitas Wira Bhakti, Indonesia^{2,3}

**Corresponding Author: magfirahsri@gmail.com*

*Article Submission:
19 June 2025*

*Article Revised:
27 June 2025*

*Article Accepted:
29 June 2025*

*Article Published:
01 July 2025*

ABSTRACT

The global environmental crisis demands higher education to adopt innovative approaches oriented toward sustainability. Green chemistry, namely the design of chemical products and processes that reduce or eliminate the use and formation of hazardous substances, becomes a strategic approach to aligning science education with the Sustainable Development Goals. This study offers novelty by examining the integration of green chemistry principles in higher education through a global case study approach, which is rarely examined in the Indonesian context. This research not only highlights curriculum aspects, but also comprehensively examines policy dimensions, faculty training, and infrastructure readiness. These findings fill a gap in the literature by providing a comprehensive overview of the challenges and opportunities for implementing green chemistry in Indonesia. For future research, it is recommended to conduct empirical studies on the perceptions of lecturers and students, evaluations of implementation in specific study programs, as well as the development of contextually relevant and sustainable green chemistry integration models at the national level.

Keywords: *Curriculum, Green Chemistry, Higher Education, Science Education, Sustainable Development Goals*

ABSTRAK

Krisis lingkungan global menuntut pendidikan tinggi untuk mengadopsi pendekatan inovatif yang berorientasi pada keberlanjutan. Green chemistry, yakni perancangan produk dan proses kimia yang mengurangi atau menghilangkan penggunaan serta pembentukan zat berbahaya, menjadi pendekatan strategis untuk menyelaraskan pendidikan sains dengan tujuan pembangunan berkelanjutan. Studi ini memiliki kebaruan dalam mengkaji integrasi prinsip *green chemistry* dalam pendidikan tinggi melalui pendekatan studi kasus global yang jarang dikaji dalam konteks Indonesia. Penelitian ini tidak hanya menyoroti aspek kurikulum, tetapi juga menelaah dimensi kebijakan, pelatihan dosen, dan kesiapan infrastruktur secara

komprehensif. Temuan ini mengisi kekosongan literatur dengan memberikan gambaran menyeluruh tentang tantangan dan peluang implementasi *green chemistry* di Indonesia. Untuk penelitian selanjutnya, disarankan adanya studi empiris mengenai persepsi dosen dan mahasiswa, evaluasi implementasi pada program studi tertentu, serta pengembangan model integrasi *green chemistry* yang kontekstual dan berkelanjutan di tingkat nasional.

Kata Kunci: *Green Chemistry*, Kurikulum, Pendidikan Sains, Pendidikan Tinggi, Tujuan Pembangunan Berkelanjutan

PENDAHULUAN

Krisis lingkungan global semakin menunjukkan urgensinya sebagai ancaman sistemik terhadap keberlanjutan planet dan kualitas hidup manusia. Peningkatan emisi gas rumah kaca, penurunan keanekaragaman hayati, degradasi tanah, pencemaran air, dan akumulasi limbah beracun merupakan gejala dari sistem produksi dan konsumsi yang tidak berkelanjutan (Calvin dkk., 2023; Rockström dkk., 2009). Batas-batas planet (*planetary boundaries*) yang menjaga stabilitas biosfer telah terlampaui pada berbagai dimensi lingkungan, termasuk siklus nitrogen, fosfor, dan perubahan iklim (Steffen dkk., 2015). Situasi ini memperlihatkan bahwa tantangan lingkungan tidak lagi bersifat sektoral, melainkan terintegrasi dengan isu sosial, ekonomi, dan politik global.

Transformasi struktural dalam pendekatan pembangunan menjadi suatu keharusan dalam menghadapi kompleksitas krisis lingkungan global. Pendekatan teknologi konvensional yang bersifat reaktif dan berfokus pada solusi akhir (*end-of-pipe solutions*) telah terbukti tidak cukup efektif dalam mengatasi akar persoalan lingkungan. Sebaliknya, pendekatan preventif yang terintegrasi sejak awal dalam desain sistem produksi dan konsumsi semakin mendapat perhatian dalam kerangka pembangunan berkelanjutan. Salah satu pendekatan strategis yang berkembang dalam konteks ini adalah *green chemistry*, yaitu perancangan produk dan proses kimia yang secara sistematis mengurangi atau menghilangkan penggunaan serta pembentukan zat berbahaya (Anastas & Warner, 2000). Prinsip-prinsip ini tidak hanya relevan dalam industri, tetapi juga krusial untuk ditanamkan melalui sistem pendidikan formal, terutama di pendidikan tinggi.

Sejalan dengan hal tersebut, pengembangan kurikulum yang responsif terhadap isu keberlanjutan telah menjadi agenda strategis di berbagai perguruan tinggi di dunia. Inisiatif global seperti *Education for Sustainable Development* (ESD) yang diusung oleh UNESCO mendorong integrasi prinsip keberlanjutan ke dalam berbagai aspek pembelajaran, mulai dari pengembangan kurikulum, pendekatan pedagogis, hingga praktik kelembagaan (Buckler & Creech, 2014). Berbagai studi menunjukkan bahwa penerapan ESD dapat meningkatkan kesadaran ekologis, memperkuat kemampuan berpikir kritis dan sistemik, serta mendorong

partisipasi aktif mahasiswa dalam pemecahan persoalan lingkungan (Wals, 2010; Lozano dkk., 2015). Pendekatan transdisipliner ini menjadi penting, di mana sains tidak hanya diposisikan sebagai kumpulan fakta, tetapi sebagai alat untuk memahami realitas kompleks dan membangun masa depan berkelanjutan (Sterling, 2001; Barth dkk., 2007).

Namun demikian, implementasi pendidikan keberlanjutan di tingkat pendidikan tinggi masih menghadapi berbagai hambatan. Tantangan utama mencakup resistensi terhadap reformasi kurikulum, dominasi pendekatan yang bersifat disipliner-fragmentaris, serta keterbatasan kapasitas pendidik dalam mengintegrasikan prinsip keberlanjutan secara efektif dalam proses pembelajaran (Fadeeva et al., 2014; Boström et al., 2018). Di tengah kondisi tersebut, dibutuhkan pendekatan pembelajaran yang tidak hanya teoritis, tetapi juga aplikatif dan kontekstual, untuk menjembatani kesenjangan antara ilmu pengetahuan dan aksi keberlanjutan.

Penelitian ini menawarkan kebaruan melalui fokus kajian pada integrasi prinsip *green chemistry* dalam pendidikan tinggi, sebuah topik yang masih jarang dibahas dalam studi-studi pendidikan sebelumnya. Selama ini, sebagian besar kajian pendidikan cenderung menyoroti integrasi keberlanjutan secara umum melalui pendekatan *Education for Sustainable Development* (ESD), tanpa mengulas secara spesifik pendekatan berbasis disiplin sains seperti *green chemistry*. Studi ini mengangkat *green chemistry* sebagai pintu masuk yang konkret dan strategis untuk mentransformasikan pendidikan sains menuju arah yang lebih berkelanjutan, misalnya melalui perancangan kurikulum kontekstual, pendekatan pembelajaran berbasis masalah lingkungan nyata, dan integrasi nilai keberlanjutan dalam praktik laboratorium. Dengan demikian, penelitian ini memberikan kontribusi signifikan dalam mengisi celah literatur mengenai bagaimana prinsip ilmiah yang aplikatif dapat diarusutamakan dalam pendidikan tinggi melalui reformulasi kurikulum, penyesuaian kebijakan, dan penguatan dukungan kelembagaan.

Sehubungan dengan itu, muncul pertanyaan utama yang menjadi fokus kajian ini: bagaimana praktik integrasi *green chemistry* dalam pendidikan tinggi di berbagai negara, dan sejauh mana pendekatan tersebut relevan untuk diterapkan dalam konteks kurikulum pendidikan tinggi di Indonesia?.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif dengan desain studi kasus eksploratif untuk menelaah praktik integrasi *green chemistry* dalam kurikulum pendidikan tinggi di berbagai negara serta menilai relevansi penerapannya dalam konteks Indonesia. Studi kasus

dipilih karena memungkinkan analisis mendalam terhadap fenomena kompleks yang kontekstual, khususnya terkait kebijakan, strategi implementasi, serta dinamika institusional dalam pengintegrasian prinsip kimia berkelanjutan di lingkungan akademik (Yin, 2018).

Unit analisis dalam penelitian ini mencakup institusi pendidikan tinggi di beberapa negara yang telah mengimplementasikan *green chemistry* secara sistematis dalam kurikulumnya, seperti Amerika Serikat, Inggris, dan Jerman, yang dipilih berdasarkan literatur dan dokumentasi kebijakan pendidikan lingkungan terkini. Data diperoleh melalui studi dokumen (*documentary analysis*) terhadap kurikulum resmi, laporan institusi, publikasi akademik, serta pedoman pengajaran yang tersedia secara daring. Di samping itu, dilakukan telaah literatur sistematis untuk mengidentifikasi model integrasi *green chemistry*, pendekatan pedagogis, serta tantangan dan keberhasilan implementasi di tingkat universitas.

Untuk mengkaji relevansi konteks Indonesia, dilakukan analisis komparatif terhadap kebijakan nasional pendidikan tinggi dan dokumen kurikulum dari sejumlah perguruan tinggi yang memiliki program studi di bidang kimia atau sains lingkungan. Dalam tahap ini, fokus diarahkan pada struktur kurikulum, muatan mata kuliah, serta keberadaan prinsip *green chemistry* dalam dokumen pembelajaran. Teknik analisis data menggunakan pendekatan tematik (*thematic analysis*) untuk mengidentifikasi pola-pola temuan utama yang mencerminkan praktik internasional dan potensi adopsinya di Indonesia (Braun & Clarke, 2006).

Kredibilitas data dijaga melalui teknik triangulasi sumber, yaitu dengan membandingkan berbagai jenis data sekunder dari jurnal ilmiah, laporan institusi, dan kebijakan nasional maupun internasional. Seluruh proses analisis dilaksanakan secara interpretatif dengan mempertimbangkan konteks sosial, kebijakan, dan budaya akademik yang memengaruhi integrasi prinsip keberlanjutan dalam pendidikan tinggi.

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

1. Praktik Internasional dalam Integrasi Green Chemistry di Pendidikan Tinggi

Integrasi prinsip-prinsip *green chemistry* dalam pendidikan tinggi telah mengalami perkembangan yang signifikan secara global, terutama di negara-negara yang telah mengintegrasikan *Education for Sustainable Development* (ESD) ke dalam kebijakan nasional maupun institusional. Di Amerika Serikat, inisiatif *Green Chemistry Commitment* (GCC) yang digagas oleh Beyond Benign sejak tahun 2013 telah berperan sebagai katalisator dalam mendorong lebih dari 130 institusi pendidikan tinggi untuk mengadopsi prinsip-prinsip kimia hijau dalam kurikulum mereka. Gerakan ini tidak hanya berfokus pada integrasi konten

substansial, melainkan juga pada transformasi pendekatan pedagogis melalui pengembangan laboratorium berkelanjutan yang menitikberatkan pada penggunaan bahan kimia yang lebih aman, efisiensi atom, serta pengurangan limbah sejak tahap perancangan eksperimen (BB GCC, 2023; Hjeresen dkk., 2000). Selain itu, inisiatif ini turut mengembangkan kompetensi abad ke-21, seperti kemampuan berpikir kritis, kolaborasi, dan pemecahan masalah, melalui pembelajaran kimia hijau yang kontekstual dan relevan dengan permasalahan kehidupan nyata.

Salah satu contoh konkret penerapan *green chemistry* dalam pendidikan tinggi dapat ditemukan di University of Oregon yang mengembangkan laboratorium kimia organik tingkat awal berbasis penuh pada prinsip-prinsip kimia hijau. Inisiatif ini secara signifikan mengurangi paparan terhadap bahan kimia berbahaya, sekaligus meningkatkan kesadaran mahasiswa terhadap dimensi etika dan lingkungan dalam praktik laboratorium (Cann & Dickneider, 2004). Di Inggris, University of York melalui *Green Chemistry Centre of Excellence* menerapkan pendekatan *problem-based learning* (PBL) dan *systems thinking*, yang terbukti tidak hanya meningkatkan pemahaman konseptual mahasiswa, tetapi juga mengembangkan kompetensi lintas disiplin dalam merancang solusi kimia yang berkelanjutan dan efisien (Bozell, 2002; Rauch, 2015) Model pembelajaran semacam ini dinilai lebih efektif dibandingkan pendekatan tradisional karena mendorong integrasi antara ilmu dasar kimia dengan konteks sosial dan lingkungan global.

Lebih lanjut, penerapan kurikulum interdisipliner di berbagai universitas di kawasan Eropa telah mengintegrasikan elemen kimia, ilmu lingkungan, ekonomi sirkular, serta kebijakan publik. Inisiatif regional seperti Erasmus+ berperan dalam mendukung pengembangan modul pembelajaran lintas negara, penyelenggaraan lokakarya internasional, serta pelatihan dosen dalam pedagogi *green chemistry* (European Commission, 2025a, 2025b; Zuin dkk., 2021). Integrasi prinsip-prinsip *Twelve Principles of Green Chemistry* (Anastas & Warner, 2000) dalam kurikulum diperkuat dengan penggunaan alat evaluasi keberlanjutan seperti *Life Cycle Assessment* (LCA), analisis jejak karbon, serta penerapan konsep *green engineering* dalam proyek-proyek berbasis mahasiswa. Pendekatan ini memungkinkan mahasiswa tidak hanya memahami reaksi kimia dari aspek reaktivitas dan *yield*, tetapi juga mengevaluasi dampak lingkungan jangka panjang yang ditimbulkan.

Studi yang dilakukan oleh Aubrecht dkk., (2019) dan D'eon dkk., (2023) menunjukkan bahwa pengintegrasian prinsip *green chemistry* secara sistematis dalam pendidikan tinggi dapat meningkatkan literasi keberlanjutan mahasiswa secara signifikan, sekaligus memperkuat kesadaran akan kontribusi ilmu kimia dalam pencapaian *Sustainable Development Goals* (SDGs), khususnya SDG 12 (*Responsible Consumption and Production*) dan SDG 13 (*Climate*

Action). Dalam konteks ini, *green chemistry* diposisikan tidak semata sebagai pendekatan teknis, melainkan juga sebagai paradigma etis dan sosial dalam pendidikan sains.

Keberhasilan praktik internasional tersebut bertumpu pada empat pilar utama: (1) dukungan kebijakan yang eksplisit baik di tingkat institusi maupun nasional terhadap integrasi keberlanjutan dalam pendidikan tinggi; (2) pengembangan materi ajar yang kontekstual, aplikatif, dan berbasis tantangan nyata (*real-world problems*); (3) pelatihan pedagogis berkelanjutan bagi tenaga pengajar serta penguatan *teaching community* lintas negara; dan (4) kemitraan strategis dengan industri hijau dan sektor publik guna mendukung transfer ilmu dari lingkungan akademik ke masyarakat (Burmeister dkk., 2012; Day dkk., 2024; Hamidah dkk., 2017) Praktik-praktik tersebut dapat menjadi rujukan strategis bagi negara-negara berkembang, termasuk Indonesia, dalam merancang pendekatan kurikulum yang kontekstual dan berkelanjutan untuk mengintegrasikan prinsip *green chemistry* ke dalam pendidikan sains dan teknik.



Gambar 1. Prinsip *Green Chemistry*

2. Analisis Kontekstual Kurikulum Sains di Indonesia

Perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi dewasa ini menuntut pembaruan paradigma dalam penyusunan kurikulum pendidikan tinggi, khususnya di bidang sains dan kesehatan yang berbasis penggunaan bahan kimia dalam praktikum dan riset. Salah satu pendekatan yang berkembang secara global adalah integrasi prinsip *green chemistry* atau kimia hijau sebagai pijakan ilmiah dan etika dalam pendidikan sains modern. Prinsip ini penting tidak hanya untuk meningkatkan efisiensi dan keamanan praktik laboratorium, tetapi juga sebagai respons terhadap isu keberlanjutan, krisis iklim, serta paparan bahan berbahaya dalam lingkungan kerja akademik maupun profesi (Anastas & Warner, 2000; Mahaffy dkk., 2019).

Namun, hasil telaah terhadap kurikulum program studi di Indonesia yang berbasis praktik kimia seperti Kimia, Pendidikan Kimia, Biologi, Farmasi, Kesehatan Masyarakat, Analisis Kesehatan, dan Ilmu Lingkungan, menunjukkan bahwa penerapan prinsip *green chemistry* masih bersifat fragmentaris dan tidak terintegrasi secara eksplisit dalam desain kurikulum. Mata kuliah seperti Kimia Lingkungan, Teknologi Proses Bersih, Farmasetika, maupun Toksikologi memang telah menyentuh aspek keberlanjutan dan keamanan bahan, tetapi belum mencantumkan secara eksplisit indikator pembelajaran berbasis prinsip *green chemistry*, seperti pencegahan pencemaran sejak sumber, efisiensi atom, desain bahan kimia yang terurai secara hayati, atau penggunaan reagen alternatif yang lebih ramah lingkungan (Hamidah dkk., 2017; Harahap & Sutiani, 2023; Lestari dkk., 2025; Pertiwi & Wahyuningrum, 2024; Rahma dkk., 2024).

Salah satu tantangan paling fundamental dalam upaya integrasi *green chemistry* ke dalam kurikulum pendidikan tinggi di Indonesia adalah disparitas kompetensi tenaga pendidik, baik dari segi pemahaman konseptual maupun keterampilan pedagogis yang relevan dengan prinsip keberlanjutan. Studi literatur oleh Inayah dkk., (2022) menunjukkan bahwa sebagian besar guru dan dosen kimia di Indonesia belum memiliki pemahaman yang memadai mengenai prinsip *green chemistry*, serta minim pengalaman dalam pelatihan formal yang menekankan pendekatan pedagogi berkelanjutan. Akibatnya, *green chemistry* sering kali diposisikan sebagai pelengkap atau wacana tambahan, bukan sebagai bagian integral dalam proses pembelajaran kimia.

Meskipun demikian, sejumlah studi mencatat adanya minat tinggi dari pendidik terhadap integrasi prinsip kimia hijau. Penelitian oleh Rahma dkk., (2024) di SMAN 9 Makassar menunjukkan bahwa guru memiliki ketertarikan kuat untuk mengadopsi pendekatan ini, tetapi menghadapi kendala berupa keterbatasan fasilitas laboratorium, tidak tersedianya peralatan praktikum yang mendukung eksperimen ramah lingkungan, serta kurangnya bahan ajar kontekstual dalam bahasa Indonesia yang relevan dengan karakteristik peserta didik. Meskipun panduan praktikum berbasis *green chemistry* dinyatakan sangat layak secara akademik dan pedagogis, pelaksanaannya masih terkendala oleh absennya sistem pengelolaan limbah laboratorium dan protokol kerja yang aman serta berkelanjutan.

Ketiadaan model laboratorium pendidikan berbasis *green chemistry* di institusi pendidikan tinggi Indonesia semakin memperlebar kesenjangan antara praktik lokal dan standar internasional. Di negara-negara seperti Amerika Serikat dan Inggris, laboratorium pendidikan telah mengadopsi pendekatan keberlanjutan secara komprehensif, termasuk penggunaan teknik mikroskala untuk meminimalkan limbah, sistem manajemen bahan berbahaya yang ketat, serta

pemanfaatan reagen alami sebagai pengganti senyawa toksik (Cann & Dickneider, 2004; Lancaster, 2016). Model ini tidak hanya menekan risiko kesehatan bagi mahasiswa dan dosen, tetapi juga berperan penting dalam menginternalisasi nilai-nilai etika lingkungan dan tanggung jawab ilmiah sejak dini.

Selain persoalan pedagogis dan teknis, aspek kebijakan juga menjadi hambatan struktural dalam integrasi green chemistry. Hingga saat ini, belum terdapat regulasi nasional yang mewajibkan adopsi prinsip keberlanjutan dalam kurikulum pendidikan tinggi, baik dalam dokumen Standar Nasional Pendidikan Tinggi (SN-Dikti), akreditasi oleh BAN-PT, maupun LAM-PTKes. Hal ini kontras dengan sejumlah negara yang telah menjadikan *Education for Sustainable Development* (ESD) sebagai elemen wajib dalam kurikulum sains dan kesehatan (UNESCO, 2024).

Lebih lanjut, kekurangan panduan praktikum yang mudah diterapkan dan sesuai dengan prinsip green chemistry juga menjadi penghambat. Penelitian oleh (Fajriyati, 2023). menunjukkan bahwa penuntun praktikum berbasis green chemistry untuk materi elektrokimia kelas XII telah terbukti sangat valid (95–96%) dan praktis (guru 91,96%, siswa 83%) untuk digunakan. Namun, implementasinya masih terhambat oleh minimnya dukungan sarana laboratorium, seperti pengelolaan limbah dan fasilitas ramah lingkungan yang menegaskan bahwa keberhasilan green chemistry tidak hanya ditentukan oleh kualitas materi, tetapi juga oleh kesiapan infrastruktur dan dukungan kelembagaan.

Keberhasilan integrasi *green chemistry* dalam pendidikan tinggi memerlukan intervensi secara sistemik dan lintas level. Diperlukan peningkatan kapasitas tenaga pendidik, penyediaan sumber belajar kontekstual dalam bahasa Indonesia, pengembangan model laboratorium berkelanjutan, serta kebijakan nasional yang mendukung keberlanjutan sebagai prinsip utama dalam pendidikan sains. Inisiatif kolektif antara akademisi, institusi pendidikan, dan pembuat kebijakan menjadi kunci dalam mendorong transformasi kurikulum yang sejalan dengan Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (TPB/SDGs), khususnya SDG 4 (pendidikan berkualitas), SDG 3 (kehidupan sehat), dan SDG 12 (konsumsi dan produksi yang bertanggung jawab). Tanpa langkah konkret dalam waktu dekat, sistem pendidikan tinggi Indonesia berisiko gagal menyiapkan lulusan yang kompeten dan bertanggung jawab terhadap masa depan planet ini.

3. Implikasi dan Relevansi Integrasi di Indonesia

Integrasi *green chemistry* dalam pendidikan tinggi di Indonesia memiliki implikasi strategis yang signifikan, baik dalam aspek lingkungan, sosial, maupun ekonomi. Secara konseptual, *green chemistry* merupakan pendekatan ilmiah yang menekankan perancangan produk dan

proses kimia yang meminimalkan penggunaan dan pembentukan bahan berbahaya (Anastas & Warner, 2000). Integrasi ini berperan penting dalam mengarahkan pendidikan tinggi menuju praktik yang tidak hanya teknis, tetapi juga berorientasi pada etika, keberlanjutan, dan tanggung jawab sosial.

Dalam konteks kebijakan, integrasi green chemistry secara langsung relevan dengan komitmen Indonesia terhadap Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs), khususnya SDG 4 (pendidikan berkualitas) dan SDG 12 (produksi dan konsumsi berkelanjutan). Hal ini juga sejalan dengan arah strategis Rencana Induk Riset Nasional (RIRN) yang menempatkan inovasi hijau sebagai pendorong transformasi ekonomi dan teknologi (UNESCO, 2024). Dengan demikian, pendidikan tinggi berpotensi menjadi simpul penting dalam mencetak sumber daya manusia yang mampu berpikir sistemik dan bertindak berkelanjutan.

Implikasi akademik dari integrasi ini juga sangat signifikan. Kurikulum yang mengadopsi prinsip *green chemistry* dapat meningkatkan relevansi keilmuan dengan kebutuhan industri hijau dan mendorong riset terapan yang berorientasi lingkungan. Studi oleh Zuin dkk., (2021) menunjukkan bahwa pengajaran *green chemistry* dapat membentuk kemampuan berpikir kritis, kolaborasi lintas disiplin, dan kesadaran etis mahasiswa secara lebih kuat dibandingkan pendekatan tradisional. Selain itu, pendekatan seperti *project-based learning* (PjBL) yang berbasis isu lingkungan lokal terbukti efektif dalam menginternalisasi prinsip keberlanjutan ke dalam proses pembelajaran (Cann & Dickneider, 2004).

Dalam praktiknya, integrasi green chemistry di Indonesia menghadapi tantangan struktural, seperti keterbatasan infrastruktur laboratorium ramah lingkungan, kurangnya pelatihan dosen, serta belum eksplisitnya prinsip green chemistry dalam kurikulum nasional. Oleh karena itu, diperlukan strategi bertahap, antara lain:

1. Revisi silabus dan capaian pembelajaran untuk memasukkan prinsip-prinsip green chemistry;
2. Pengembangan modul ajar kontekstual yang berbasis kearifan lokal dan isu lingkungan nyata;
3. Peningkatan kapasitas dosen melalui pelatihan nasional dan kerja sama internasional; dan;
4. Pengembangan laboratorium mini yang menerapkan praktik kimia hijau secara praktis dan ekonomis (Lancaster, 2016).

Dengan mengadopsi langkah-langkah ini, pendidikan tinggi di Indonesia tidak hanya akan mengejar ketertinggalan dalam penguasaan teknologi berkelanjutan, tetapi juga berpotensi menjadi agen transformasi sosial dan ekologis melalui penguatan sains yang etis, partisipatif,

dan berbasis nilai keberlanjutan.

KESIMPULAN

Integrasi *green chemistry* dalam pendidikan tinggi merupakan langkah strategis dalam merespons krisis lingkungan global melalui pendekatan ilmiah yang preventif dan berkelanjutan. Praktik internasional menunjukkan bahwa keberhasilan integrasi ini sangat bergantung pada dukungan kebijakan, pendekatan pedagogis yang transformatif, dan keterlibatan lintas sektor. Di Indonesia, meskipun kesadaran terhadap pentingnya prinsip *green chemistry* mulai tumbuh, implementasinya masih terbatas oleh tantangan struktural seperti minimnya pemahaman dosen, infrastruktur laboratorium yang tidak mendukung, serta belum adanya regulasi nasional yang mendorong integrasi keberlanjutan dalam kurikulum. Untuk itu, diperlukan strategi sistemik dan kolaboratif yang mencakup pembaruan silabus, pelatihan tenaga pengajar, pengembangan modul kontekstual, serta pendirian laboratorium berbasis praktik kimia hijau. Jika langkah-langkah ini dilakukan secara konsisten, pendidikan tinggi di Indonesia berpotensi menjadi garda terdepan dalam mencetak generasi ilmuwan dan profesional yang beretika, visioner, dan bertanggung jawab terhadap masa depan planet ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Anastas, P. T., & Warner, J. C. (2000). *Green Chemistry: Theory and Practice*. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/oso/9780198506980.001.0001>
- Aubrecht, K. B., Bourgeois, M., Brush, E. J., MacKellar, J., & Wissinger, J. E. (2019). Integrating Green Chemistry in the Curriculum: Building Student Skills in Systems Thinking, Safety, and Sustainability. *Journal of Chemical Education*, 96(12), 2872–2880. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.9b00354>
- Barth, M., Godemann, J., Rieckmann, M., & Stoltenberg, U. (2007). Developing key competencies for sustainable development in higher education. *International Journal of Sustainability in Higher Education*, 8(4), 416–430. <https://doi.org/10.1108/14676370710823582>
- BB GCC. (2023). *2022 Status Report Green Chemistry Commitment*. <https://www.beyondbenign.org/wordpress/wp-content/uploads/BB-GCC-Impact-Report-FINAL-4.13.2023-1.pdf>
- Bozell, J. J. (2002). Green Chemistry in Practice. Dalam *Handbook of Green Chemistry and Technology* (hlm. 338–365). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9780470988305.ch14>
- Braun, V., & Clarke, V. (2006). Using thematic analysis in psychology. *Qualitative Research in Psychology*, 3(2), 77–101. <https://doi.org/10.1191/1478088706qp0630a>
- Buckler, C., & Creech, H. (2014). *Shaping the Future We Want: UN Decade of Education for Sustainable Development (2005-2014) : Final Report*. UNESCO.

- Burmeister, M., Rauch, F., & Eilks, I. (2012). Education for Sustainable Development (ESD) and chemistry education. *Chem. Educ. Res. Pract.*, 13(2), 59–68. <https://doi.org/10.1039/C1RP90060A>
- Calvin, K., Dasgupta, D., Krinner, G., Mukherji, A., Thorne, P. W., Trisos, C., Romero, J., Aldunce, P., Barrett, K., Blanco, G., Cheung, W. W. L., Connors, S., Denton, F., Diongue-Niang, A., Dodman, D., Garschagen, M., Geden, O., Hayward, B., Jones, C., ... Péan, C. (2023). *IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]*. IPCC, Geneva, Switzerland. (First). Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- Cann, M. C., & Dickneider, T. A. (2004). Infusing the Chemistry Curriculum with Green Chemistry Using Real-World Examples, Web Modules, and Atom Economy in Organic Chemistry Courses. *Journal of Chemical Education*, 81(7), 977. <https://doi.org/10.1021/ed081p977>
- Day, E. L., Petritis, S. J., McFall-Boegeman, H., Starkie, J., Zhang, M., & Cooper, M. M. (2024). A Framework for the Integration of Green and Sustainable Chemistry into the Undergraduate Curriculum: Greening Our Practice with Scientific and Engineering Practices. *Journal of Chemical Education*, 101(5), 1847–1857. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.3c00737>
- 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), 2185109. <https://doi.org/10.1080/17518253.2023.2185109>
- European Commission. (2025a). *Priorities of the Erasmus+ Programme—Erasmus+*. <https://erasmus-plus.ec.europa.eu/programme-guide/part-a/priorities-of-the-erasmus-programme>
- European Commission. (2025b, Februari 18). *Learning for the green transition and sustainable development—European Education Area*. <https://education.ec.europa.eu/focus-topics/green-education/learning-for-the-green-transition>
- Fajriyati, P. (2023). *Desain dan Uji Coba Penuntun Praktikum Berbasis Green Chemistry Pada Materi Elektrokimia Untuk Kelas XII SMA* [Skripsi, UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SULTAN SYARIF KASIM RIAU]. https://repository.uin-suska.ac.id/74008/?utm_source=chatgpt.com
- 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. <https://doi.org/10.12973/ijpce/79220>
- Harahap, S. R. D., & Sutiani, A. (2023). DEVELOPMENT OF A GUIDEBOOK FOR BASED CHEMISTRY PRACTICES GREEN CHEMISTRY IN REACTION RATE MATERIALS. *Jurnal Ilmu Pendidikan Indonesia*, 11(1), Article 1. <https://doi.org/10.31957/jipi.v11i1.2745>

- Hjerresen, D. L., Boese, J. M., & Schutt, D. L. (2000). Green Chemistry and Education. *Journal of Chemical Education*, 77(12), 1543. <https://doi.org/10.1021/ed077p1543>
- Inayah, S., Dasna, I. W., & Habiddin, H. (2022). Implementasi Green Chemistry Dalam Pembelajaran Kimia: Literatur Review. *Hydrogen: Jurnal Kependidikan Kimia*, 10(1), 42–49. <https://doi.org/10.33394/hjkk.v10i1.4611>
- Lancaster, M. (2016). *Green Chemistry: An Introductory Text*. The Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/9781839168888>
- Lestari, N. A., Sulistyowati, D., Dellatiani, Y., Irawan, N. Z. P., Fadhilah, A., & Muyassaroh, A. (2025). Implementation of green chemistry approaches in chemistry labs instruction: A systematic literature review. *Jurnal Pendidikan Kimia*, 16(3), Article 3. <https://doi.org/10.24114/jpkim.v16i3.65184>
- Lozano, R., Ceulemans, K., Alonso-Almeida, M., Huisingh, D., Lozano, F. J., Waas, T., Lambrechts, W., Lukman, R., & Hugé, J. (2015). A review of commitment and implementation of sustainable development in higher education: Results from a worldwide survey. *Journal of Cleaner Production*, 108, 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.09.048>
- Mahaffy, P. G., Matlin, S. A., Holme, T. A., & MacKellar, J. (2019). Systems thinking for education about the molecular basis of sustainability. *Nature Sustainability*, 2(5), 362–370. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0285-3>
- Pertiwi, A. M., & Wahyuningrum, D. (2024). The Development of Green Chemistry Teaching Material Based on Organic Compound Synthesis. *EduChemia: Jurnal Kimia Dan Pendidikan*, 9(2), 132–148. <https://doi.org/10.30870/educhemia.v9i1.24452>
- Rahma, R., Jusniar, J., & Auliah, A. (2024). Pengembangan Modul Ajar terintegrasi Green Chemistry berorientasi Project Based Learning untuk meningkatkan Kemampuan Berpikir Kritis Siswa SMA (Studi pada Materi Pokok Keseimbangan Kimia). *ChemEdu*, 5(3), Article 3. <https://doi.org/10.35580/chemedu.v5i3.64626>
- Rauch, F. (2015). *Education for Sustainable Development and Chemistry Education*. <https://doi.org/10.1039/9781782621942-00016>
- Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin, F. S., Lambin, E. F., Lenton, T. M., Scheffer, M., Folke, C., Schellnhuber, H. J., Nykvist, B., de Wit, C. A., Hughes, T., van der Leeuw, S., Rodhe, H., Sörlin, S., Snyder, P. K., Costanza, R., Svedin, U., ... Foley, J. A. (2009). A safe operating space for humanity. *Nature*, 461(7263), 472–475. <https://doi.org/10.1038/461472a>
- Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S. E., Fetzer, I., Bennett, E. M., Biggs, R., Carpenter, S. R., de Vries, W., de Wit, C. A., Folke, C., Gerten, D., Heinke, J., Mace, G. M., Persson, L. M., Ramanathan, V., Reyers, B., & Sörlin, S. (2015). Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science*, 347(6223), 1259855. <https://doi.org/10.1126/science.1259855>
- Sterling, S. R. (with Internet Archive). (2001). *Sustainable education: Re-visioning learning and change*. Totnes: Green Books for the Schumacher Society. <http://archive.org/details/sustainableeduca0000ster>

- UNESCO. (2024). *Education for sustainable development: What you need to know*.
<https://www.unesco.org/en/sustainable-development/education/need-know>
- Wals, A. E. J. (2010). Mirroring, Gestaltswitching and transformative social learning. *International Journal of Sustainability in Higher Education*, 11(4), 380–390.
<https://doi.org/10.1108/14676371011077595>
- Yin, R. K. (2018). *Case Study Research and Applications: Design and Methods, 6th Edition*. SAGE Publications, Inc.
[//opaclib.inaba.ac.id%2Findex.php%3Fp%3Dshow_detail%26id%3D2642%26keywords%3D](http://opaclib.inaba.ac.id%2Findex.php%3Fp%3Dshow_detail%26id%3D2642%26keywords%3D)
- Zuin, V. G., Eilks, I., Elschami, M., & Kümmerer, K. (2021). Education in green chemistry and in sustainable chemistry: Perspectives towards sustainability. *Green Chemistry*, 23(4), 1594–1608. <https://doi.org/10.1039/D0GC03313H>