

Implementasi dan Urgensi Integrasi Prinsip *Green Chemistry* dalam Praktikum IPA di Sekolah: *A Literature Review*

Hendro Perta ^{a, 1*}, Helti Riana ^{a, 2}, Thoriq ^{b, 3}, Dita Arisona ^{c, 4}

^a Universitas Negeri Yogyakarta, Jl. Colombo No.1, Karang Malang, Caturtunggal, Kecamatan Depok, Kabupaten Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta 55281

^b Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesa No.10, Lb. Siliwangi, Kecamatan Coblong, Kota Bandung, Jawa Barat 40132

^c STKIP PGRI Bangkalan, Jl. Soekarno Hatta No.52, Wt 07, Mlajah, Kec. Bangkalan, Kabupaten Bangkalan, Jawa Timur 69116

¹ hendroperta18@gmail.com*; ² heltiviellgluck1@gmail.com ; ³ tbrothers150@gmail.com;

⁴ ditaarisona@gmail.com

*korespondensi penulis

ARTICLE HISTORY

Received: 30 Agustus 2025

Revised: 24 September 2025

Accepted: 30 September 2025

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji penerapan prinsip *Green Chemistry* dalam praktikum Ilmu Pengetahuan Alam (IPA) di sekolah sebagai upaya mewujudkan pembelajaran yang aman, ramah lingkungan, dan berkelanjutan. Metode yang digunakan adalah *literature review* dengan pendekatan kualitatif deskriptif terhadap artikel ilmiah yang dipublikasikan dalam jurnal nasional dan internasional dari tahun 2015-2024. Adapun tahapan literatur review yang dilaksanakan terdiri atas pengumpulan database, seleksi dan pemilihan database, dan analisis sesuai fokus kajian. Hasil kajian menunjukkan bahwa prinsip *Green Chemistry* dapat diimplementasikan melalui substitusi bahan berbahaya dengan bahan alternatif yang lebih aman, penggunaan eksperimen berskala mikro untuk mengurangi limbah, serta pengembangan modul praktikum ramah lingkungan. Manfaat penerapan ini terlihat dari meningkatnya keterampilan proses sains peserta didik, berkurangnya risiko kecelakaan laboratorium, dan terbentuknya sikap peduli lingkungan. Meskipun demikian, terdapat tantangan berupa keterbatasan fasilitas laboratorium, minimnya kompetensi guru, serta belum adanya regulasi yang mendukung secara eksplisit. Simpulan dari kajian ini adalah bahwa *Green Chemistry* berperan penting dalam memperkuat pembelajaran IPA yang kontekstual, aman, dan relevan dengan tuntutan pendidikan abad ke-21. Hasil tersebut menunjukkan bahwa pendekatan *Green Chemistry* memiliki peluang besar diterapkan pada praktikum IPA di Sekolah dengan memperhatikan berbagai aspek yang berkaitan dengan prinsip dan implementasinya.

Kata kunci : *Green Chemistry*, praktikum IPA

ABSTRACT

Integrating Green Chemistry Principles into School Science Practicum. This study aims to examine the application of Green Chemistry principles in Natural Science (IPA) laboratory practices in schools as an effort to realize safe, environmentally friendly, and sustainable learning. The method used is a literature review with a descriptive qualitative approach to scientific articles published in national and international journals from 2015–2024. The stages of the literature review consist of database collection, selection and screening of databases, and analysis according to the focus of the study. The results show that Green Chemistry principles can be implemented through the substitution of hazardous materials with safer alternatives, the use of microscale experiments to reduce waste, and the development of environmentally friendly laboratory practice modules. The benefits of this implementation are seen in the improvement of students' science process skills, the reduction of laboratory accident risks, and the development of environmental awareness. However, there are challenges such as limited laboratory facilities, lack of teacher competence, and the absence of explicit supporting regulations. The conclusion of this study is that Green Chemistry plays an important role in strengthening science learning that is contextual, safe, and relevant to the demands of 21st-century education. These findings indicate that the Green Chemistry approach has the potential to be applied in school science laboratory practices, provided that various aspects related to its principles and implementation are taken into consideration..

Keywords: Green Chemistry, science practicum

Pendahuluan

Ilmu Pengetahuan Alam (IPA) di sekolah memiliki peran strategis dalam membentuk literasi sains pada peserta didik, baik dari aspek pengetahuan, keterampilan, maupun sikap ilmiah. Pengembangan literasi sains dalam mata pelajaran IPA dilaksanakan dengan berbagai cara, diantaranya penggunaan model pembelajaran, strategi pembelajaran, termasuk kegiatan praktikum. Praktikum merupakan salah satu metode pembelajaran yang dirancang agar peserta didik bisa mendapatkan pengalaman langsung melalui kegiatan *hands on* dan *minds on* (Ochogboju, A. O., & Díez-Palomar, 2025). Lebih lanjut, kegiatan praktikum IPA juga dapat menjadikan pembelajaran menjadi lebih kontekstual yang dapat menghubungkan konsep teoritis dengan pengalaman nyata, sehingga peserta didik mampu memahami fenomena ilmiah melalui kegiatan eksperimen (Falloon, 2019; Quiroga, M. D. M., & Choate, 2019; Darmawan & Sangaji, 2022).

Namun demikian, pelaksanaan praktikum IPA di sekolah sering menghadapi berbagai permasalahan, salah satunya terkait penggunaan bahan kimia yang berpotensi menimbulkan risiko terhadap kesehatan, keselamatan, dan lingkungan. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa kegiatan praktikum IPA di Sekolah masih memiliki potensi untuk mencemari lingkungan sekitar (Alifatunnisa et al, 2024; Fajarianingtyas, D. A., & Hidayat, J. N, 2022). Fenomena ini menimbulkan kebutuhan akan pendekatan pembelajaran praktikum yang lebih aman, ramah lingkungan, dan berkelanjutan. Kajian dan penelitian mengenai praktikum yang lebih ramah lingkungan telah berkembang dalam beberapa tahun terakhir, salah satu yang menjadi fokus dalam pengembangan praktikum ramah lingkungan ini yaitu penerapan prinsip *Green Chemistry*.

Green Chemistry atau kimia hijau merupakan paradigma yang menekankan pada prinsip penggunaan bahan dan proses kimia yang meminimalkan dampak negatif terhadap lingkungan (Gilbertson, et al, 2015; Kurul et al, 2025). Penerapan prinsip *Green Chemistry* dalam kegiatan praktikum IPA tidak hanya berorientasi pada pengurangan limbah berbahaya, tetapi juga pada optimalisasi pemanfaatan sumber daya, keselamatan peserta didik, serta penanaman nilai kepedulian terhadap lingkungan (Qulub et al, 2023). Dengan demikian, *Green Chemistry* dapat menjadi solusi yang dapat diterapkan di Sekolah dalam menjawab tantangan pembelajaran IPA di era modern yang menuntut adanya perpaduan antara aspek sains, teknologi, dan keberlanjutan lingkungan melalui kegiatan yang melibatkan peserta didik.

Penerapan prinsip *Green Chemistry* telah banyak diulas dalam ranah pendidikan tinggi, namun demikian penelitian mengenai implementasinya dalam konteks praktikum IPA di sekolah masih relatif terbatas (Widyawati et al, 2024). Sebagian besar sekolah masih menggunakan prosedur praktikum konvensional dengan bahan dan teknik yang tidak sepenuhnya memperhatikan aspek keberlanjutan (Lestari et al, 2018; Supatmi, 2022). Hal ini menimbulkan kesenjangan antara tuntutan global terhadap pendidikan yang berwawasan lingkungan dengan realitas pelaksanaan praktikum di sekolah. Hal tersebut menunjukkan adanya kebutuhan mendesak untuk mengeksplorasi dan memperkuat integrasi *Green Chemistry* dalam pembelajaran IPA di tingkat sekolah.

Berdasarkan permasalahan tersebut, artikel ini bertujuan untuk mengkaji penerapan prinsip *Green Chemistry* dalam praktikum IPA di sekolah melalui metode *literature review* terhadap berbagai artikel ilmiah dari jurnal nasional dan internasional. Kajian ini diharapkan

dapat memberikan gambaran komprehensif mengenai peluang, tantangan, serta strategi penerapan *Green Chemistry* dalam pembelajaran IPA, sekaligus memperkuat urgensi pengembangan model praktikum yang berkelanjutan, aman, dan relevan dengan tuntutan pendidikan abad ke-21.

Metode

Artikel ini disusun menggunakan metode *literature review* dengan pendekatan kualitatif deskriptif. Metode ini dipilih karena memungkinkan peneliti untuk memperoleh pemahaman yang komprehensif mengenai penerapan prinsip *Green Chemistry* dalam praktikum IPA di sekolah berdasarkan hasil-hasil penelitian yang telah dipublikasikan sebelumnya. Secara umum tahapan literatur review yang dilaksanakan yaitu pengumpulan literatur, seleksi literatur, dan analisis literatur (Cooper et al, 2018). Proses pengumpulan literatur dilakukan melalui penelusuran artikel ilmiah pada berbagai basis data jurnal nasional maupun internasional, seperti *Google Scholar*, *ScienceDirect*, *SpringerLink*, dan *DOAJ*. Pencarian dilakukan dengan menggunakan kata kunci “*Green Chemistry in education*”, “*Green Chemistry in science practicum*”, “*sustainable laboratory practices*”, dan “praktikum IPA ramah lingkungan”. Artikel yang dipilih sebanyak 22 artikel yang sudah dipublikasikan pada jurnal nasional terakreditasi maupun jurnal internasional bereputasi dari tahun 2015-2024. Selain itu, artikel yang dianalisis juga harus relevan dengan topik penerapan prinsip *Green Chemistry* dalam pendidikan, serta diterbitkan dalam kurun waktu sepuluh tahun terakhir agar tetap sesuai dengan konteks perkembangan terkini.

Literatur yang telah terkumpul kemudian dianalisis menggunakan pendekatan analisis tematik. Analisis dilakukan dengan mengelompokkan berbagai temuan penelitian ke dalam tema-tema utama, seperti konsep dan prinsip *Green Chemistry* dalam pembelajaran, implementasi praktikum IPA berbasis *Green Chemistry* serta urgensi dalam praktikum IPA Sekolah. Selanjutnya, hasil analisis dari berbagai sumber disintesis untuk menghasilkan gambaran menyeluruh mengenai peluang, strategi, dan arah pengembangan penerapan *Green Chemistry* dalam praktikum IPA di sekolah.

Hasil dan Pembahasan

Konsep dan Prinsip *Green Chemistry* dalam Pembelajaran IPA

Green Chemistry merupakan pendekatan ilmiah yang menitikberatkan pada pencegahan pencemaran melalui perancangan bahan, produk, dan proses yang lebih aman bagi manusia serta lingkungan (Zimmerman et al, 2020; Gilbertson et al, 2015). Prinsip-prinsip dasar yang diusung meliputi efisiensi dalam penggunaan bahan, pengurangan atau penghindaran zat berbahaya, penggunaan sumber daya terbarukan, dan minimalisasi limbah (Ivanković et al, 2015; Sheldon, 2016). Konsep ini pertama kali diperkenalkan dalam konteks industri kimia, namun dalam perkembangannya semakin banyak diadaptasi ke ranah pendidikan, termasuk pendidikan IPA di sekolah.

Dalam pembelajaran IPA, penerapan prinsip *Green Chemistry* dapat berfungsi ganda, yaitu sebagai upaya meningkatkan keselamatan dalam praktikum sekaligus sebagai sarana pendidikan lingkungan (Wahyuningsih et al, 2018; Zuin et al, 2021). Peserta didik tidak hanya memahami konsep secara teoretis mengenai zat dan reaksi kimia, tetapi juga dilatih untuk

mempertimbangkan dampak eksperimen terhadap kesehatan dan lingkungan. Hal ini menjadikan praktikum bukan sekadar sarana penguatan pemahaman konsep, tetapi juga sarana untuk internalisasi nilai keberlanjutan pada diri peserta didik (Qulub et al, 2023; Allanas et al, 2024).

Kajian literatur menunjukkan bahwa banyak penelitian menekankan relevansi *Green Chemistry* dengan tujuan pendidikan abad ke-21, khususnya pada aspek *sustainability literacy* (Aubrecht et al, 2019; Mitarlis et al, 2017). Peserta didik diharapkan mampu mengaitkan pengetahuan ilmiah dengan isu-isu global seperti pencemaran, krisis energi, dan perubahan iklim. Dengan demikian, pembelajaran IPA berbasis *Green Chemistry* dapat memperkuat peran pendidikan dalam membentuk generasi yang tidak hanya cerdas secara kognitif, tetapi juga beretika dalam menggunakan ilmu pengetahuan. Selain itu, prinsip *Green Chemistry* juga sejalan dengan konsep *education for sustainable development* (ESD) yang kini menjadi orientasi global pendidikan (Widyawati et al, 2024). Integrasi nilai keberlanjutan dalam pembelajaran IPA dapat mendorong perubahan paradigma peserta didik dari sekadar memahami sains sebagai pengetahuan, menjadi sains sebagai instrumen untuk menjaga kelestarian lingkungan.

Implementasi Praktikum IPA Berbasis *Green Chemistry*

Penerapan *Green Chemistry* dalam praktikum IPA di sekolah telah dilakukan dengan berbagai cara yang sesuai dengan kondisi masing-masing laboratorium. Salah satu strategi yang banyak ditemukan dalam literatur adalah modifikasi prosedur praktikum dengan mengganti bahan kimia berbahaya menjadi bahan alternatif yang lebih ramah lingkungan (Wahyuningsih, 2017; Widyastuti et al, 2022; Sundusiyah, et al, 2023). Misalnya, penggunaan asam sitrat atau cuka dapur untuk menggantikan asam kuat dalam percobaan asam-basa, serta pemanfaatan pewarna alami seperti ekstrak bunga sebagai indikator titrasi. Strategi tersebut dapat mengurangi risiko kecelakaan dan limbah berbahaya tanpa mengurangi kualitas pengalaman belajar peserta didik.

Selain substitusi bahan, pendekatan *micro scale experiment* juga menjadi pilihan yang banyak digunakan (Allanas et al, 2024; Supatmi, 2022). Melalui teknik ini, jumlah bahan kimia yang digunakan dalam eksperimen dikurangi hingga skala mikroliter, sehingga menghasilkan limbah yang lebih sedikit dan menekan biaya praktikum. Pendekatan ini juga mendukung keterampilan ketelitian dan presisi peserta didik, karena setiap prosedur dilakukan pada skala yang lebih kecil namun tetap valid secara ilmiah. Sebagai contoh pada praktikum asam basa yang menggunakan *micro scale* baik dari segi penggunaan bahan maupun alat-alat yang digunakan (Allanas, 2024).

Implementasi *Green Chemistry* juga mencakup pengaturan ulang desain praktikum. Beberapa penelitian melaporkan adanya pengembangan modul praktikum baru yang mengintegrasikan prinsip ramah lingkungan sejak tahap perencanaan (Armansyah, 2025; Qulub, 2023). Praktikum tidak hanya diarahkan untuk membuktikan konsep ilmiah, tetapi juga menekankan refleksi peserta didik terhadap dampak eksperimen yang dilakukan. Dengan demikian, kegiatan praktikum IPA menjadi sarana pembelajaran sains sekaligus pendidikan karakter lingkungan.

Namun demikian, tingkat penerapan *Green Chemistry* di sekolah-sekolah masih sangat bervariasi. Sekolah dengan fasilitas laboratorium yang baik lebih mudah mengadopsi praktik ini dibanding sekolah yang memiliki keterbatasan sarana. Meski demikian, penelitian menunjukkan bahwa penerapan sederhana, seperti pengurangan volume bahan atau pemilihan bahan rumah tangga sebagai pengganti bahan kimia berbahaya, dapat dilakukan hampir di semua konteks sekolah. Hal ini memperlihatkan bahwa *Green Chemistry* dapat diimplementasikan secara fleksibel sesuai kondisi masing-masing institusi pendidikan.

Manfaat dan Urgensi Penerapan

Penerapan *Green Chemistry* dalam praktikum IPA membawa sejumlah manfaat secara pedagogis yang bermanfaat bagi pengembangan peserta didik. Peserta didik yang mengikuti praktikum berbasis prinsip ini menunjukkan peningkatan keterampilan proses sains (Hernani & Khoerunnisa, 2023), seperti observasi, pengukuran, dan analisis data, dengan tetap memperhatikan faktor keselamatan. Selain itu, pengalaman belajar menjadi lebih kontekstual karena siswa diajak untuk menghubungkan kegiatan praktikum dengan isu lingkungan nyata yang mereka hadapi sehari-hari (Al-Idrus et al, 2020). Hal ini menjadikan pembelajaran lebih bermakna dan berdampak jangka panjang.

Dari sisi lingkungan, manfaat yang paling nyata adalah berkurangnya jumlah limbah berbahaya yang dihasilkan dari kegiatan praktikum (Günter et al, 2017). Praktikum konvensional sering kali menghasilkan sisa bahan kimia yang sulit dikelola, sedangkan pendekatan *Green Chemistry* menekan penggunaan bahan berbahaya dan berpotensi mencemari (Alifatunnisa et al, 2024). Dengan demikian, sekolah dapat berkontribusi langsung pada upaya pelestarian lingkungan melalui praktik pendidikan yang lebih bertanggung jawab.

Manfaat lain juga terlihat dari aspek sosial dan karakter. Praktikum berbasis *Green Chemistry* menumbuhkan kepedulian peserta didik terhadap isu lingkungan sejak dini (Susanti, 2022). Mereka dibiasakan untuk berpikir kritis dalam mempertimbangkan dampak sains terhadap kehidupan, serta diajarkan nilai tanggung jawab dalam setiap tindakan ilmiah yang dilakukan. Dengan cara ini, pembelajaran IPA berfungsi tidak hanya sebagai sarana akademis, tetapi juga sebagai pendidikan moral dan sosial. Urgensi penerapan *Green Chemistry* dalam praktikum IPA semakin diperkuat oleh tuntutan global terhadap pendidikan berkelanjutan. Konsep *Education for Sustainable Development* (ESD) yang dicanangkan UNESCO menekankan pentingnya integrasi nilai keberlanjutan dalam setiap jenjang pendidikan. Oleh karena itu, sekolah sebagai lembaga pendidikan dasar memiliki peran penting untuk menanamkan nilai keberlanjutan sejak dini, salah satunya melalui penerapan *Green Chemistry* dalam praktikum IPA.

Simpulan

Penerapan prinsip *Green Chemistry* dalam praktikum IPA di sekolah terbukti memiliki urgensi tinggi karena mampu meningkatkan keselamatan, mengurangi limbah, serta menanamkan nilai kepedulian lingkungan kepada peserta didik. Kajian literatur menunjukkan bahwa melalui substitusi bahan berbahaya dengan bahan ramah lingkungan, penerapan eksperimen berskala mikro, dan pengembangan modul praktikum berkelanjutan, pembelajaran IPA tidak hanya memperkuat pemahaman konsep sains tetapi juga membentuk karakter peduli

lingkungan. Meskipun masih terdapat kendala berupa keterbatasan fasilitas, kompetensi guru, dan dukungan kebijakan, penerapan *Green Chemistry* tetap menjadi strategi penting untuk mewujudkan pendidikan IPA yang relevan dengan tuntutan abad ke-21 sekaligus berkontribusi pada pembangunan berkelanjutan. Hasil kajian tersebut memberikan gambaran bahwa pendekatan *Green Chemistry* dapat diimplementasikan dalam praktikum IPA sekolah dengan memperhatikan berbagai aspek, seperti karakteristik materi dan kesiapan guru dalam merancang prosedur yang memperhatikan aspek *Green Chemistry*.

Referensi

- Al-Idrus, S. W., Hadisaputra, S., & Junaidi, E. (2020). Pendekatan green chemistry dalam modul praktikum kimia lingkungan untuk meningkatkan kreatifitas mahasiswa calon guru kimia. *Chemistry Education Practice*, 3(2), 69-73. Retrieved from <https://jurnal.fkip.unram.ac.id/index.php/CEP/article/view/2110>
- Allanas, E., Suryani, E., & Affriliani, P. N. (2024). Pengembangan Praktikum Microscale untuk Menganalisis Pemahaman Prinsip Green Chemistry. *Jurnal Riset Pendidikan Kimia (JRPK)*, 14(2), 75-86. <https://doi.org/10.21009/JRPK.142.01>
- Alifatunnisa, N. A., Nazhifah, S. S. Z., Noviliani, Y., Royani, A., & Mulyah, E. (2024). Analisis Pengelolaan Limbah Praktikum Biologi di Madrasah Aliyah X, Tangerang Selatan. *INSOLOGI: Jurnal Sains dan Teknologi*, 3(4), 412-419. <https://doi.org/10.55123/insologi.v3i4.3902>
- Armansyah, A. (2025). Prototipe Aplikasi Laporan Praktikum Berbasis Ramah Lingkungan dengan Pendekatan System Development Life Cycle (SDLC). *Jurnal SISKOM-KB (Sistem Komputer dan Kecerdasan Buatan)*, 8(3), 227-235. <https://doi.org/10.47970/siskom-kb.v8i3.831>
- 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. Retrieved from <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.jchemed.9b00354>
- Cooper, C., Booth, A., Varley-Campbell, J., Britten, N., & Garside, R. (2018). Defining the process to literature searching in systematic reviews: a literature review of guidance and supporting studies. *BMC medical research methodology*, 18(1), 85. <https://doi.org/10.1186/s12874-018-0545-3>
- Darmawan, A., & Sangaji, F. (2023). Seberapa Efektif Penggunaan Model Pembelajaran Scientific dalam Praktikum Ilmu Pengetahuan Alam. *SEARCH: Science Education Research Journal*, 1(2), 14-21. <https://doi.org/10.47945/search.v1i2.1248>
- Fajariningtyas, D. A., & Hidayat, J. N. (2022). PELATIHAN PENGOLAHAN LIMBAH MINYAK GORENG MENJADI SABUN PADAT DENGAN EKSTRAK LIDAH BUAYA DALAM PENDIDIKAN KEWIRAUSAHAAN. *Jurnal ABDIRAJA*, 5(1), 18-23. <https://doi.org/10.24929/adr.v5i1.1113>
- Falloon, G. (2019). Using simulations to teach young students science concepts: An Experiential Learning theoretical analysis. *Computers & Education*, 135, 138-159.
- Gilbertson, L. M., Zimmerman, J. B., Plata, D. L., Hutchison, J. E., & Anastas, P. T. (2015). Designing nanomaterials to maximize performance and minimize undesirable implications guided by the Principles of Green Chemistry. *Chemical Society Reviews*, 44(16), 5758-5777. Retrieved from <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2015/cs/c4cs00445k/unauth>

- Günter, T., Akkuzu, N., & Alpat, Ş. (2017). Understanding ‘green chemistry’ and ‘sustainability’: an example of problem-based learning (PBL). *Research in science & Technological Education*, 35(4), 500-520. <https://doi.org/10.1080/02635143.2017.1353964>
- Hernani, H., & 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. Retrieved from <http://jurnal.radenfatah.ac.id/index.php/orbital/article/view/16839>
- Ivanković, A., Dronjić, A., Bevanda, A. M., & Talić, S. (2017). Review of 12 principles of green chemistry in practice. *International Journal of Sustainable and Green Energy*, 6(3), 39-48.
- Kurul, F., Doruk, B., & Topkaya, S. N. (2025). Principles of green chemistry: building a sustainable future. *Discover Chemistry*, 2(1), 68. <https://doi.org/10.1007/s44371-025-00152-9>
- Lestari, S., Mursali, S., & Royani, I. (2018). Pengaruh Model Pembelajaran Langsung Berbasis Praktikum Terhadap Keterampilan Proses Sains dan Kemampuan Berpikir Kritis Siswa. *Bioscientist: Jurnal Ilmiah Biologi*, 6(1), 67-79. <https://doi.org/10.33394/bioscientist.v6i1.2367>
- Mitarlis, Ibnu, S., Rahayu, S., & Sutrisno. (2017, December). Environmental literacy with green chemistry oriented in 21st century learning. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1911, No. 1, p. 020020). AIP Publishing LLC.
- Ochogboju, A. O., & Díez-Palomar, J. (2025). Modeling Concrete and Virtual Manipulatives for Mathematics Teacher Training: A Case Study in ICT-Enhanced Pedagogies. *Information*, 16(8), 698.
- Quiroga, M. D. M., & Choate, J. K. (2019). A virtual experiment improved students’ understanding of physiological experimental processes ahead of a live inquiry-based practical class. *Advances in Physiology Education*, 43(4), 495-503. <https://doi.org/10.1152/advan.00050.2019>
- Qulub, T., Misrochah, N., & Rahmatulloh, R. (2023, December). Development of Green Chemistry Integrated Environmental Chemistry Practical Instructions. In *Social, Humanities, and Educational Studies (SHES): Conference Series* (Vol. 6, No. 4). Retrieved from <https://jurnal.uns.ac.id/SHES/article/view/81253>
- Sheldon, R. A. (2016). Green chemistry and resource efficiency: towards a green economy. *Green Chemistry*, 18(11), 3180-3183. Retrieved from <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2016/gc/c6gc90040b>
- Sundusiyah, A., Mulyanti, S., & Sari, W. K. (2023). Pengembangan Petunjuk Praktikum Larutan Asam Basa Berbasis Pbl (Problem Based Learning) Berorientasi Green Chemistry. *Jurnal Zarah*, 11(1), 41-46. <https://doi.org/10.31629/zarah.v11i1.4961>
- Supatmi, S. (2022). Peningkatan Keterampilan Proses Sains Melalui Praktikum Kimia Berbasis Skala Mikro Materi Stoikiometri. *Jurnal Riset Pendidikan Kimia (JRPK)*, 12(1), 47-58. <https://doi.org/10.21009/JRPK.121.07>
- Susanti, L. Y. (2022). Pengembangan Modul Praktikum berbasis Green Chemistry untuk Menanamkan Karakter Peduli Lingkungan pada Calon Guru IPA. *Jurnal Pendidikan MIPA*, 12(3), 798-807. <https://doi.org/10.37630/jpm.v12i3.657>
- Wahyuningsih, A. S. (2017). Pengembangan Modul Praktikum Kimia Dasar Berbasis Green Chemistry Untuk Mahasiswa Calon Guru Ipa. *Jurnal Pena Sains*, 4(1), 43-51. Retrieved from <http://eprints.umsida.ac.id/310/>
- Wahyuningsih, A. S., Multazam, M. T., Nandiyanto, A. B. D., Abdullah, A. G., & Widiaty, I. (2018). Green chemistry principles: an alternative approach to practice laboratory safety and health. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 288, No. 1, p. 012001). IOP Publishing.

- Widyawati, R., Novita, M., Patonah, S., & Roshayanti, F. (2024). Tantangan dan Peluang dalam Pendidikan Kimia Hijau Berorientasi Education for Sustainable Development (ESD) di Sekolah Menengah Atas: Studi Kasus di Kabupaten Sragen. *Didaktika: Jurnal Kependidikan*, 13(001 Des), 537-548. <https://doi.org/10.58230/27454312.1287>
- Widyastuti, S., Yusrina, N., Fadhillah, S. G., & Khunur, M. M. (2022). Penerapan Konsep Kurikulum Hijau dan Kimia Hijau dalam Desain Praktikum dan Pengolahan Limbah Laboratorium Kimia. <https://doi.org/10.21776/ub.igtj.2022.011.01.03>
- Zimmerman, J. B., Anastas, P. T., Erythropel, H. C., & Leitner, W. (2020). Designing for a green chemistry future. *Science*, 367(6476), 397-400. Retrieved from <https://www.science.org/doi/full/10.1126/science.aay3060>
- 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. Retrieved from <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2021/gc/d0gc03313h>