CAUSA
ISSN 3031-0369

Jurnal Hukum dan Kewarganegaraan
Vol 17 No 1 Tahun 2026
Cahaya Ilmu Bangsa Institute

DISPARITAS REGULASI PENGELOLAAN LIMBAH B3 SKALA PENDIDIKAN: URGENSI INTEGRASI GREEN CHEMISTRY SEBAGAI INSTRUMEN KEPATUHAN HUKUM PREVENTIF DI LABORATORIUM SMA

Muhammad Fikri Adhi Ardani[1]*, Dinda Dwi Noverina[2]
[1] Program Studi Ilmu Hukum, [2] Program Studi Pendidikan Kimia — UIN Syarif Hidayatullah Jakarta

Email : muhammadfikriadhi@gmail.com

ABSTRAK

Penyelenggaraan praktikum kimia pada jenjang Sekolah Menengah Atas (SMA) merupakan amanat kurikuler untuk memverifikasi konsep sains secara empiris, namun secara simultan memosisikan sekolah sebagai penghasil Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun (Limbah B3). Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis disharmoni regulasi pengelolaan Limbah B3 terhadap karakteristik laboratorium SMA beserta konstruksi pertanggungjawaban hukumnya, merumuskan mekanisme transformasi praktikum melalui Green Chemistry dan *microscale* chemistry, serta merancang model integrasi Green Chemistry sebagai instrumen kepatuhan hukum preventif (*preventive regulatory compliance*). Penelitian interdisipliner ini memadukan metode penelitian hukum normatif (melalui pendekatan perundang-undangan dan konseptual terhadap UU PPLH jo. UU Cipta Kerja, PP No. 22 Tahun 2021, serta regulasi standar pendidikan) dengan studi pustaka pendidikan kimia terhadap stoikiometri dan toksikologi reagen kurikulum kimia SMA. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pertama, rezim PP No. 22 Tahun 2021 bersifat bias industri (*one-size-fits-all*) karena tidak mengatur diferensiasi bagi penghasil limbah skala mikro (*Very Small Quantity Generators*) dan tidak sinkron dengan regulasi Standar Sarana Prasarana serta Juknis Dana BOSP, sehingga menciptakan kemustahilan kepatuhan (*lex non cogit ad impossibilia*) yang membuat Kepala Sekolah, Kepala Laboratorium, dan Guru Kimia rentan terhadap sanksi administratif, *strict liability*, hingga delik pidana lingkungan. Kedua, operasionalisasi Green Chemistry melalui substitusi reagen berbahaya (seperti mengganti senyawa Pb^{2+}, Cr^{6+}, Co^{2+}, dan Ba^{2+} dengan sistem $CaCl_2/Na_2CO_3$, antosianin, Vitamin C Iodine Clock, dan asam sitrat/$NaHCO_3$) serta reduksi skala tetes (*microscale* chemistry) mampu mereduksi timbulan limbah berbahaya hingga lebih dari 99,9% dan menghilangkan karakteristik korosif serta beracun tanpa mereduksi validitas konsep ilmiah. Ketiga, pelembagaan Green Chemistry menjadi SOP wajib dan daftar larangan pengadaan reagen B3 dalam regulasi pendidikan berfungsi menggugurkan objek normatif Limbah B3 dan unsur kesalahan (*culpa*) sejak di hulu (*source reduction*), yang harus disinergikan dengan skema pengumpulan limbah kolektif (Collective Waste Collection) oleh Dinas Pendidikan dan Dinas Lingkungan Hidup Provinsi di bagian hilir.

Kata Kunci: Green Chemistry; Kepatuhan Hukum Preventif; Laboratorium Sekolah; Limbah B3; Microscale Chemistry; Pertanggungjawaban Hukum.

Article History
Received: November 2026
Reviewed: November 2026
Published: November 2026

Copyright : Author
Publish by : CAUSA

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.

ABSTRACT

Regulatory Disparity in Educational-Scale Hazardous Waste Management: The Urgency of Integrating Green Chemistry as a Preventive Legal Compliance Instrument in High School Laboratories

Conducting chemistry laboratory work at the Senior High School (SMA) level is a curricular mandate to empirically verify scientific concepts, yet it simultaneously positions schools as generators of Hazardous and Toxic Waste (B3 Waste). This study aims to analyze the regulatory disharmony of B3 Waste management concerning the characteristics of high school laboratories and the construction of legal liability, formulate practical transformation mechanisms through Green Chemistry and microscale chemistry, and design an integration model of Green Chemistry as an instrument of preventive regulatory compliance. This interdisciplinary research combines doctrinal legal research (utilizing statutory and conceptual approaches toward Law No. 32/2009 as amended by the Job Creation Law, Government Regulation No. 22/2021, and national education standards) with a chemical education literature review analyzing reaction stoichiometry and reagent toxicology within the high school chemistry curriculum. The results demonstrate that, first, the regulatory regime under Government Regulation No. 22/2021 exhibits an industrial bias (one-size-fits-all) by failing to differentiate Very Small Quantity Generators (VSQG) and lacking horizontal synchronization with Educational Infrastructure Standards and School Operational Assistance Fund (BOSP) regulations, thereby creating structural impossibility of compliance (lex non cogit ad impossibilia) that exposes school principals, laboratory heads, and chemistry teachers to administrative sanctions, strict civil liability, and environmental criminal offenses. Second, operationalizing Green Chemistry through benign reagent substitution (replacing neurotoxic and carcinogenic Pb^{2+}, Cr^{6+}, Co^{2+}, and Ba^{2+} compounds with $CaCl_2/Na_2CO_3$ systems, anthocyanins, Vitamin C Iodine Clock reactions, and citric acid/$NaHCO_3$) alongside microscale chemistry techniques reduces hazardous waste generation by over 99.9% and eliminates toxic and corrosive characteristics without compromising pedagogical validity. Third, institutionalizing Green Chemistry into mandatory laboratory Standard Operating Procedures (SOPs) and negative procurement lists within educational regulations eliminates the normative object of B3 Waste and negates the element of fault (culpa) directly upstream (source reduction), which must be complemented downstream by a regional Collective Waste Collection Scheme coordinated by Provincial Education and Environmental Agencies.

***Keywords**: Green Chemistry; Hazardous Waste; Legal Liability; Microscale Chemistry; Preventive Legal Compliance; School Laboratory.*

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang Masalah

Hak atas lingkungan hidup yang baik dan sehat di Indonesia berdiri di atas dua pijakan sekaligus: hak asasi manusia dan hak konstitusional warga negara, sebagaimana ditegaskan Pasal 28H ayat (1) Undang-Undang Dasar Negara Republik Indonesia Tahun 1945 (UUD NRI 1945). Pada saat yang bersamaan, Pasal 31 UUD NRI 1945 mengamanatkan kewajiban konstitusional negara untuk menyelenggarakan sistem pendidikan nasional guna mencerdaskan kehidupan bangsa serta memajukan ilmu pengetahuan dan teknologi. Koeksistensi kedua norma dasar tersebut melahirkan konsekuensi yuridis bahwa penyelenggaraan pendidikan—terutama pendidikan sains pada jenjang Sekolah Menengah Atas (SMA)—wajib dilaksanakan secara selaras dengan prinsip perlindungan ekosistem dan pencegahan pencemaran lingkungan. Dalam struktur kurikulum pendidikan menengah, pembelajaran ilmu kimia memegang peranan sentral yang tidak dapat dipisahkan dari kegiatan praktikum di laboratorium sebagai wahana epistemologis untuk memverifikasi konsep-konsep teoretis yang abstrak, mulai dari hukum dasar kimia dan stoikiometri, kesetimbangan kimia, kinetika laju reaksi, termokimia, hingga reaksi reduksi-oksidasi (redoks) dan elektrokimia. Akan tetapi, operasionalisasi laboratorium kimia sekolah demi memenuhi standar proses pendidikan tersebut menyimpan paradoks ekologis dan yuridis, sebab setiap aktivitas reaksi kimia yang melibatkan reagen sintetis secara inheren memosisikan institusi pendidikan sebagai entitas penghasil limbah Bahan Berbahaya dan Beracun (Limbah B3).

Profil limbah praktikum kimia SMA konvensional menyimpan bahaya intrinsik yang tidak dapat diabaikan, meskipun volume per eksperimen relatif kecil. Volume kecil tidak berarti risiko kecil. Berbagai prosedur praktikum standar dalam panduan pembelajaran kimia SMA masih mengandalkan reagen yang mengandung kation logam berat transisi, senyawa pengoksidasi kuat, serta pelarut dan larutan asam-basa korosif (Shintya Dewi dkk., 2019; Kisdiono dkk., 2023; Indarwati, 2020). Sebagai ilustrasi konkret, pembuktian reaksi pengendapan dan stoikiometri kerap menggunakan reaksi antara timbal(II) nitrat ($Pb(NO_3)_2$) dengan kalium iodida (KI) yang menghasilkan endapan kuning timbal(II) iodida (PbI_2); pengamatan pergeseran kesetimbangan kimia dan reaksi redoks sering memanfaatkan kalium kromat (K_2CrO_4) serta kalium dikromat ($K_2Cr_2O_7$) yang mengandung spesiasi kromium heksavalen (Cr^{6+}); sedangkan pengujian sifat koligatif, analisis kualitatif kation-anion, maupun titrasi argentometri melibatkan perak nitrat ($AgNO_3$), tembaga(II) sulfat ($CuSO_4$), hingga senyawa kobalt (Co^{2+}) dan nikel (Ni^{2+}). Spesies kimia seperti Pb^{2+} dan Cr^{6+} merupakan agen nefrotoksik, neurotoksik, serta karsinogenik yang tidak dapat terdegradasi secara biologis di alam. Ketika ribuan laboratorium SMA di seluruh Indonesia secara rutin membuang efluen sisa reaksi tersebut langsung ke wastafel laboratorium yang terhubung dengan saluran drainase domestik tanpa pengolahan pendahuluan, terbentuklah fenomena pencemaran sumber tak tentu secara kumulatif yang memicu bioakumulasi dan biomagnifikasi logam berat pada badan air permukaan maupun akuifer air tanah (Ali dkk., 2019).

Merespons potensi ancaman ekologis dari zat berbahaya tersebut, hukum positif Indonesia telah membangun rezim pengaturan yang sangat ketat melalui Undang-Undang Nomor 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup (UU PPLH) sebagaimana telah diubah sebagian dengan Undang-Undang Nomor 6 Tahun 2023 tentang Penetapan Peraturan Pemerintah Pengganti Undang-Undang Nomor 2 Tahun 2022 tentang Cipta Kerja menjadi Undang-Undang (UU Cipta Kerja), yang dijabarkan lebih lanjut dalam Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup (PP No. 22 Tahun 2021). Dalam arsitektur normatif peraturan perundang-undangan tersebut, hukum lingkungan Indonesia mengadopsi prinsip pencegahan dan prinsip pencemar membayar yang mewajibkan “Setiap Orang” yang menghasilkan Limbah B3 untuk melakukan pengelolaan Limbah B3 yang dihasilkannya. Lebih jauh lagi, dalam klasifikasi sumber Limbah B3 dari sumber spesifik maupun sumber tidak spesifik sebagaimana

diatur dalam Lampiran IX PP No. 22 Tahun 2021, sisa bahan kimia kadaluwarsa, tumpahan reagen, kemasan bekas B3, serta residu hasil pengujian laboratorium dikategorikan secara limitatif sebagai Limbah B3 yang wajib dikelola melalui tahapan pengurangan, penyimpanan sementara di Tempat Penyimpanan Sementara (TPS) Limbah B3 yang memenuhi rincian teknis, pengumpulan, pengangkutan, hingga pengolahan dan penimbunan akhir oleh pihak ketiga yang mengantongi perizinan berusaha atau persetujuan pemerintah.

Namun, apabila konstruksi norma hukum positif (das Sollen) tersebut dibenturkan dengan realitas sosiologis dan kelembagaan satuan pendidikan menengah (das Sein), tampak adanya disparitas dan asimetri regulasi yang akut. Rezim pengelolaan Limbah B3 dalam UU PPLH jo. UU Cipta Kerja dan PP No. 22 Tahun 2021 dirancang dengan paradigma yang sangat bias industri skala besar dan menerapkan pendekatan seragam tanpa mengenal diferensiasi norma berdasarkan skala timbulan limbah. Berbeda dengan rezim hukum lingkungan di berbagai negara maju yang menyediakan kerangka regulasi khusus dan relaksasi prosedur administratif bagi penghasil limbah skala sangat kecil (Very Small Quantity Generators, selanjutnya VSQG) seperti laboratorium sekolah menengah (Zimmer, 1999; Monz & McDonough, 2006; Gutierrez, 2026), hukum positif Indonesia mewajibkan sekolah menengah tunduk pada standar teknis yang sama ketatnya dengan korporasi manufaktur atau rumah sakit. Untuk mematuhi kewajiban tersebut, sebuah SMA harus membangun fasilitas penyimpanan sementara yang memenuhi spesifikasi teknis geologis dan struktural, melakukan uji karakteristik laboratorium secara berkala, serta menyewa jasa pengangkut (transporter) dan pengolah Limbah B3 berizin yang menerapkan tarif komersial berbasis kuota berat minimum. Kewajiban finansial dan birokratis ini berada jauh di luar kapasitas fiskal sekolah yang bergantung pada Dana Bantuan Operasional Sekolah (BOS), yang petunjuk teknisnya membatasi penggunaan dan tidak dirancang untuk membiayai kontrak pengolahan limbah industri berbiaya tinggi. Beban itu tidak proporsional. Kondisi ini melahirkan ketidakmungkinan kepatuhan secara struktural, yang dalam adagium hukum dikenal sebagai lex non cogit ad impossibilia—hukum tidak seyogianya memaksakan sesuatu yang mustahil dilaksanakan oleh subjek hukumnya.

Disparitas regulasi ini semakin meruncing akibat terjadinya disharmoni horizontal dan fragmentasi sektoral antara regulasi di bidang lingkungan hidup dan regulasi di bidang pendidikan nasional. Berdasarkan Undang-Undang Nomor 20 Tahun 2003 tentang Sistem Pendidikan Nasional beserta peraturan menteri turunannya mengenai Standar Sarana dan Prasarana Pendidikan Menengah, setiap satuan pendidikan menengah diwajibkan memiliki ruang laboratorium untuk pembelajaran praktik yang memerlukan peralatan khusus dengan luas minimal 1,5 (satu koma lima) kali luas ruang kelas sebagai syarat pemenuhan standar nasional pendidikan dan akreditasi sekolah (Pasal 11 huruf c jo. Pasal 14 Permendikbudristek No. 22 Tahun 2023); spesifikasi rinci ruang laboratorium kimia SMA—termasuk rasio luas per peserta didik—sebelumnya diatur dalam Lampiran Permendiknas No. 24 Tahun 2007 yang telah dicabut oleh Permendikbudristek No. 22 Tahun 2023. Akan tetapi, instrumen hukum di sektor pendidikan tersebut hanya mengatur ketersediaan tempat sampah umum dan saluran pembuangan air kotor konvensional tanpa menyediakan protokol hukum maupun skema kelembagaan yang menjembatani kepatuhan sekolah terhadap rezim pengelolaan Limbah B3 dalam PP No. 22 Tahun 2021. Akibatnya, jajaran pengelola sekolah—mulai dari Kepala Sekolah selaku penanggung jawab tertinggi institusi, Wakil Kepala Sekolah Bidang Sarana dan Prasarana, Kepala Laboratorium IPA/Kimia, hingga Guru Kimia dan Laboran—terjebak dalam dilema yuridis yang pelik. Di titik ini, dua rezim hukum saling mengunci. Apabila mereka tetap menyelenggarakan praktikum kimia sesuai tuntutan kurikulum nasional lalu menyimpan limbah reagen melebihi batas waktu maksimal penyimpanan atau membuangnya ke media lingkungan tanpa persetujuan teknis, mereka secara formal memenuhi unsur pelanggaran administratif bahkan delik pidana formil maupun materiil terkait pengelolaan dan dumping Limbah B3 dalam UU PPLH jo. UU Cipta Kerja (Pasal 98, Pasal 99, Pasal 103, Pasal 104, dan

Pasal 109 UU PPLH). Sebaliknya, apabila sekolah memilih menghentikan seluruh kegiatan praktikum basah demi menghindari risiko kriminalisasi lingkungan, institusi pendidikan tersebut gagal menjalankan mandat kurikulum dan melakukan degradasi terhadap mutu pedagogi sains peserta didik.

Untuk meretas kebuntuan dialektis antara ancaman sanksi hukum lingkungan dan stagnasi mutu pendidikan kimia tersebut, pendekatan penegakan hukum yang bertumpu pada pengendalian pencemaran di hilir terbukti tidak relevan. Pengendalian di hilir sudah kehabisan daya; yang dibutuhkan adalah pencegahan pencemaran langsung dari sumbernya (source reduction). Dalam khazanah ilmu kimia modern, strategi pencegahan di hulu ini menemukan landasan epistemologisnya pada konsep Green Chemistry (Kimia Hijau) yang dipelopori oleh Paul T. Anastas dan John C. Warner (1998) melalui dua belas prinsip fundamentalnya, yang secara esensial memfokuskan desain produk dan proses kimia untuk mengurangi atau mengeliminasi penggunaan serta pembentukan zat-zat berbahaya. Melalui operasionalisasi prinsip pencegahan limbah (prevention), penggunaan pelarut dan reagen yang lebih aman (safer solvents and auxiliaries), serta perancangan bahan kimia yang mudah terdegradasi (design for degradation), prosedur praktikum kimia SMA dapat direkonstruksi secara radikal melalui dua instrumen utama: substitusi reagen berbahaya dengan bahan kimia ramah lingkungan atau ekstrak bahan alam/rumah tangga, dan reduksi skala reaksi menjadi skala mikro (microscale chemistry). Substitusi reagen memungkinkan penghapusan penggunaan ion logam berat seperti Pb^{2+}, Cr^{6+}, dan Ag^{+} tanpa mengubah esensi fenomena makroskopis maupun mekanisme reaksi yang dipelajari siswa, sedangkan teknik *microscale* chemistry mampu memangkas volume penggunaan reagen dari skala mililiter pada tabung reaksi standar menjadi skala tetes pada pelat tetes atau pipet plastik, sehingga menurunkan volume limbah hingga lebih dari 90% sekaligus menekan biaya pengadaan bahan laboratorium secara drastis (Singh dkk., 1999; Allanas dkk., 2024; Murtihapsari dkk., 2022).

Meskipun urgensi penerapan Green Chemistry telah banyak dikaji dalam literatur akademik, peta penelitian terdahulu menunjukkan keterbelahan disiplin ilmu yang menyisakan celah riset yang krusial. Di satu sisi, penelitian-penelitian dalam ranah pendidikan kimia umumnya memosisikan Green Chemistry semata-mata sebagai inovasi strategi pedagogis untuk mengembangkan Lembar Kerja Peserta Didik (LKPD), meningkatkan literasi lingkungan, atau menguji efektivitas hasil belajar kognitif siswa di kelas (Anisa & Mitarlis, 2020; Putri & Putra, 2023; Salsabila & Hernani, 2025). Di sisi lain, penelitian-penelitian dalam ranah hukum lingkungan di Indonesia masih terkonsentrasi secara eksklusif pada analisis pertanggungjawaban hukum dan penegakan sanksi pengelolaan Limbah B3 terhadap korporasi industri manufaktur, pertambangan, serta fasilitas pelayanan kesehatan (rumah sakit) (Sentoso, 2023; Sihombing, 2020; Krismen US, 2019). Belum ditemukan studi interdisipliner yang secara komprehensif membedah disharmoni norma PP No. 22 Tahun 2021 terhadap karakteristik laboratorium sekolah menengah sekaligus mengonstruksikan Green Chemistry sebagai instrumen kepatuhan hukum preventif. Celah inilah yang hendak ditutup penelitian ini. Persoalannya, ketika Green Chemistry diinstitusionalisasikan ke dalam regulasi standar sarana-prasarana dan Prosedur Operasional Standar (SOP) laboratorium SMA, modifikasi reagen di hulu secara otomatis akan mengubah karakteristik kimiawi residu praktikum sehingga tidak lagi memenuhi kriteria toksisitas, reaktivitas, maupun korosivitas Limbah B3. Dengan hilangnya sifat bahaya tersebut sejak tahap perencanaan praktikum, satuan pendidikan secara yuridis dapat terbebas dari jerat kewajiban administratif yang mustahil dipenuhi sekaligus menggugurkan potensi pertanggungjawaban hukum, sembari tetap menjamin terlaksananya hak konstitusional peserta didik atas pembelajaran kimia yang bermutu dan berwawasan ekologis.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang masalah yang memperlihatkan ketegangan antara norma hukum positif pengelolaan Limbah B3 dan realitas operasional laboratorium kimia di tingkat pendidikan menengah atas, maka permasalahan pokok dalam penelitian ini dirumuskan ke dalam tiga pertanyaan penelitian yang saling terintegrasi secara yuridis dan saintifik. Pertama, bagaimana disharmoni regulasi pengelolaan Limbah B3 dalam hukum positif Indonesia terhadap karakteristik laboratorium kimia SMA, serta bagaimana konstruksi pertanggungjawaban hukum bagi pengelola satuan pendidikan atas pengelolaan limbah praktikum tersebut? Kedua, bagaimana mekanisme transformasi praktikum kimia SMA melalui pendekatan Green Chemistry—khususnya melalui substitusi reagen berbahaya dan penerapan *microscale* chemistry—dalam mengeliminasi karakteristik Limbah B3 tanpa mereduksi validitas konsep ilmiah dalam kurikulum kimia? Ketiga, bagaimana model integrasi prinsip Green Chemistry ke dalam kerangka regulasi standar laboratorium sekolah dan tata kelola daerah sebagai instrumen kepatuhan hukum preventif (*preventive regulatory compliance*) guna mencegah terjadinya delik lingkungan di sektor pendidikan?

II. METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan penelitian interdisipliner yang memadukan metode penelitian hukum normatif dengan kajian pustaka saintifik di bidang pendidikan kimia. Pendekatan hukum normatif digunakan untuk membedah struktur hierarki perundang-undangan, koherensi norma, serta konstruksi pertanggungjawaban hukum terkait pengelolaan Limbah B3 pada skala satuan pendidikan. Guna menghindari kekakuan dogmatis yang terlepas dari konteks objek yang diatur, analisis normatif tersebut diintegrasikan dengan evaluasi ilmiah terhadap kurikulum kimia SMA, stoikiometri reaksi praktikum, serta profil toksikologi reagen laboratorium. Dalam pelaksanaannya, penelitian ini mengoperasionalkan tiga pendekatan utama secara simultan, yakni pendekatan perundang-undangan (statute approach) untuk mengkaji rasio legis dan ketepatan norma regulasi lingkungan hidup serta regulasi pendidikan nasional; pendekatan konseptual (conceptual approach) untuk membangun sintesis teoretis antara doktrin kepatuhan hukum preventif (*preventive legal compliance*), asas *lex non cogit ad impossibilia*, dan dua belas prinsip Green Chemistry; serta pendekatan komparatif-analitis untuk membandingkan tingkat bahaya dan kelayakan mekanisme reaksi antara protokol praktikum kimia SMA konvensional dengan protokol alternatif berbasis kimia hijau.

Sumber data dalam penelitian ini bertumpu pada data sekunder yang diklasifikasikan ke dalam bahan hukum dan literatur saintifik. Bahan hukum primer mencakup peraturan perundang-undangan yang memiliki kekuatan mengikat secara hierarkis dan sektoral, meliputi Undang-Undang Dasar Negara Republik Indonesia Tahun 1945, Undang-Undang Nomor 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup, Undang-Undang Nomor 6 Tahun 2023 tentang Penetapan Peraturan Pemerintah Pengganti Undang-Undang Nomor 2 Tahun 2022 tentang Cipta Kerja menjadi Undang-Undang, Undang-Undang Nomor 20 Tahun 2003 tentang Sistem Pendidikan Nasional, Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup, serta berbagai Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan (Permen LHK) dan Peraturan Menteri Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi (Permendikbudristek) yang mengatur tata cara pengelolaan Limbah B3, standar sarana dan prasarana sekolah menengah, serta petunjuk teknis pendanaan pendidikan (Permen LHK No. 6 Tahun 2021; Permendikbudristek No. 22 Tahun 2023; Permendikbudristek No. 63 Tahun 2022 sebagaimana diubah dengan Permendikbudristek No. 63 Tahun 2023—kini dicabut dan digantikan oleh Permendikdasmen No. 8 Tahun 2025, yang kemudian digantikan oleh Permendikdasmen No. 8 Tahun 2026; Permendiknas No. 24 Tahun 2007; Permendiknas No. 26 Tahun 2008; Permendikbudristek No. 40 Tahun 2021; serta Keputusan Kepala BSKAP No. 046/H/KR/2025). Adapun bahan hukum sekunder dan literatur saintifik meliputi buku teks hukum administrasi dan hukum lingkungan,

jurnal ilmiah hukum terakreditasi, literatur kanonik Green Chemistry karya Paul T. Anastas dan John C. Warner, dokumen kurikulum kimia SMA (baik Kurikulum 2013 maupun Kurikulum Merdeka pada Fase E dan Fase F), Lembar Data Keselamatan Bahan (*Safety Data Sheets* / SDS) yang mengacu pada standar *Globally Harmonized System of Classification and Labelling of Chemicals* (GHS), serta artikel jurnal terindeks nasional dan internasional mengenai inovasi *microscale* chemistry dan substitusi reagen ramah lingkungan.

Teknik pengumpulan bahan hukum dan data saintifik dilakukan melalui studi dokumentasi dan penelusuran literatur sistematis (*systematic literature and regulatory inventory*) yang dibagi ke dalam dua tahapan kerja. Pada tahapan pertama, dilakukan inventarisasi dan kodifikasi terhadap norma-norma hukum positif dalam UU PPLH jo. UU Cipta Kerja dan PP No. 22 Tahun 2021 yang mengatur kriteria penetapan Limbah B3, kewajiban penghasil limbah, standar teknis penyimpanan sementara, mekanisme perizinan pihak ketiga, serta rumusan sanksi administratif dan pidana, untuk kemudian disandingkan dengan norma standar pengelolaan laboratorium SMA dan regulasi anggaran sekolah. Pada tahapan kedua, dilakukan pemetaan kurikulum terhadap seluruh kompetensi dasar dan capaian pembelajaran kimia di tingkat SMA yang menuntut kegiatan eksperimen laboratorium. Dari pemetaan tersebut, diidentifikasi modul-modul praktikum yang secara konvensional menggunakan reagen berisiko tinggi (khususnya senyawa logam berat, oksidator kuat, dan zat karsinogenik/korosif), lalu ditelusuri persamaan reaksi alternatif serta reagen substitusi yang telah teruji secara empiris dalam literatur pendidikan kimia mampu menghasilkan fenomena kimiawi yang ekuivalen namun memiliki tingkat toksisitas minimal atau nol.

Seluruh bahan hukum dan data kimia yang telah terkumpul dianalisis secara kualitatif dengan menggunakan metode analisis preskriptif-dialektis. Analisis hukum dilakukan melalui penalaran silogisme deduktif dan interpretasi sistematis guna membuktikan adanya kekosongan norma (*leemten in het recht*) dan ketidaksinkronan horizontal antara rezim hukum lingkungan yang berorientasi industri dengan kapasitas kelembagaan satuan pendidikan, sekaligus menguraikan konstruksi pertanggungjawaban hukum (*aansprakelijkheid*) pejabat struktural dan fungsional sekolah berdasarkan doktrin hukum administrasi dan hukum pidana lingkungan. Sementara itu, data kimia dianalisis secara deskriptif-komparatif berdasarkan parameter stoikiometri reaksi, efisiensi atom, perubahan entalpi atau visualisasi produk reaksi, serta klasifikasi bahaya SDS/GHS untuk memvalidasi bahwa transformasi menuju Green Chemistry dan *microscale* chemistry secara saintifik dapat menggugurkan kualifikasi Limbah B3 pada residu praktikum. Hasil dari kedua jalur analisis tersebut kemudian disintesiskan secara interdisipliner untuk merumuskan preskripsi hukum dan rekomendasi kebijakan berupa desain integrasi Green Chemistry ke dalam regulasi standar operasional laboratorium sekolah serta skema pengelolaan limbah kolektif lintas instansi di tingkat daerah.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Disharmoni Regulasi Limbah B3 terhadap Karakteristik Laboratorium Sekolah dan Konstruksi Pertanggungjawaban Hukumnya

Rezim hukum lingkungan positif di Indonesia mengonstruksikan pengaturan Bahan Berbahaya dan Beracun (B3) serta Limbah B3 di atas fondasi pencegahan bahaya dan kewajiban hukum mutlak bagi setiap entitas penghasil limbah. Berdasarkan ketentuan Undang-Undang Nomor 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup (UU PPLH) sebagaimana telah diubah melalui Undang-Undang Nomor 6 Tahun 2023 tentang Penetapan Peraturan Pemerintah Pengganti Undang-Undang Nomor 2 Tahun 2022 tentang Cipta Kerja menjadi Undang-Undang (UU Cipta Kerja), kualitas sebagai subjek hukum "Penghasil Limbah B3" dilekatkan pada "Setiap Orang"—baik orang perseorangan maupun badan usaha, baik yang berbadan hukum maupun yang tidak berbadan hukum—yang karena usaha dan/atau kegiatannya menghasilkan Limbah B3. Perumusan frasa "usaha dan/atau kegiatan" dalam norma tersebut bersifat inklusif dan tidak membatasi keberlakuannya hanya

pada aktivitas komersial-ekstraktif, melainkan menjangkau pula aktivitas pelayanan publik non-profit di bidang pendidikan sepanjang aktivitas tersebut secara faktual menghasilkan residu yang memenuhi kriteria Limbah B3. Lebih lanjut, Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup (PP No. 22 Tahun 2021) mengklasifikasikan Limbah B3 baik berdasarkan sumbernya—yakni Limbah B3 dari sumber tidak spesifik, Limbah B3 dari B3 kedaluwarsa, B3 yang tumpah, B3 yang tidak memenuhi spesifikasi produk yang akan dibuang, dan bekas kemasan B3, serta Limbah B3 dari sumber spesifik—maupun berdasarkan uji karakteristik yang meliputi sifat mudah meledak, mudah menyala, reaktif, infeksius, korosif, dan/atau beracun.

Apabila parameter normatif dalam PP No. 22 Tahun 2021 tersebut diterapkan untuk membedah profil aktivitas laboratorium kimia Sekolah Menengah Atas (SMA), maka secara yuridis-saintifik tidak dapat dibantah bahwa laboratorium kimia SMA merupakan penghasil Limbah B3. Dalam Tabel 1 Lampiran IX PP No. 22 Tahun 2021 (daftar Limbah B3 dari sumber tidak spesifik), residu yang berasal dari kegiatan laboratorium riset, laboratorium komersial, maupun laboratorium pendidikan yang mengandung senyawa berbahaya dikodifikasikan secara tegas sebagai Limbah B3 melalui kode A106d (limbah dari laboratorium yang mengandung B3), berdampingan dengan kode A107d (pelarut bekas lainnya) dan A109d (limbah asam lainnya), serta bahan kimia kedaluwarsa yang tersimpan di gudang penyimpanan bahan laboratorium. Dari perspektif kimia analitik dan toksikologi, efluen cair maupun endapan padat sisa praktikum kimia SMA secara langsung memenuhi kriteria karakteristik korosif dan beracun. Penggunaan larutan asam sulfat (H_2SO_4), asam klorida (HCl), dan asam nitrat (HNO_3) pekat maupun encer dalam praktikum laju reaksi dan titrasi asam-basa menghasilkan limbah cair dengan nilai derajat keasaman (pH) ekstrem ($pH \leq 2$), sedangkan penggunaan larutan natrium hidroksida ($NaOH$) atau kalium hidroksida (KOH) menghasilkan limbah bersifat basa kuat ($pH \geq 12{,}5$) yang memenuhi parameter korosif secara absolut. Lebih krusial lagi, eksperimen stoikiometri pengendapan, kesetimbangan ion, dan sel volta yang melibatkan kation logam berat seperti timbal (Pb^{2+} dari $Pb(NO_3)_2$ atau $Pb(CH_3COO)_2$), kromium heksavalen (Cr^{6+} dari K_2CrO_4 dan $K_2Cr_2O_7$), perak (Ag^+ dari $AgNO_3$), kobalt (Co^{2+} dari $CoCl_2$), hingga tembaga (Cu^{2+} dari $CuSO_4$) menghasilkan konsentrasi kation terlarut yang jauh melampaui nilai ambang batas Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) maupun baku mutu air limbah. Dengan demikian, pada tataran das Sollen, setiap tetes sisa reagen logam berat dan asam-basa korosif di laboratorium SMA tunduk sepenuhnya pada rezim hukum pengelolaan Limbah B3.

Akan tetapi, ketegasan klasifikasi normatif tersebut segera memicu problematika struktural ketika diturunkan ke dalam kewajiban tata kelola administratif dan teknis yang dibebankan oleh PP No. 22 Tahun 2021 beserta peraturan pelaksananya, yakni Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor 6 Tahun 2021 tentang Tata Cara dan Persyaratan Pengelolaan Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun. Arsitektur regulasi dalam PP No. 22 Tahun 2021 dibangun di atas asumsi bahwa setiap penghasil Limbah B3 adalah entitas usaha berorientasi profit atau korporasi industri yang memiliki kapasitas modal, infrastruktur lahan, sistem manajemen keselamatan kerja, serta integrasi perizinan berusaha berbasis risiko melalui sistem Online Single Submission Risk-Based Approach (OSS-RBA). Semua kewajiban itu dirancang untuk korporasi. Regulasi ini mewajibkan setiap penghasil Limbah B3 untuk menyusun Rincian Teknis (Rintek) penyimpanan Limbah B3 yang diintegrasikan ke dalam Persetujuan Lingkungan, membangun fasilitas Tempat Penyimpanan Sementara (TPS) Limbah B3 dengan persyaratan konstruksi sipil yang rigid (meliputi lantai kedap air yang tidak bergelombang, kemiringan khusus menuju bak penampung tumpahan, sistem ventilasi, koordinat geografis tetap, serta sekat pemisah antar-karakteristik limbah yang tidak kompatibel), melakukan pengemasan dengan pelabelan dan simbol bahaya spesifik, mematuhi batas waktu penyimpanan maksimal 90 hari hingga 365 hari tergantung kategori dan berat timbulan limbah per hari (Pasal 296 PP No. 22 Tahun 2021), hingga menyerahkan limbah

tersebut kepada pihak ketiga pengumpul, pengangkut, dan pengolah Limbah B3 yang mengantongi Perizinan Berusaha dari pemerintah pusat melalui mekanisme manifes elektronik (Festronik) .

Ketika rezim yang berorientasi industri itu dihadapkan pada realitas empiris operasional laboratorium SMA, terjadi benturan asimetris yang memperlihatkan adanya kekosongan hukum (*leemten in het recht*) dalam membedakan skala dan sifat subjek hukum penghasil limbah. Berbeda secara diametral dengan pabrik kimia yang memproduksi limbah secara kontinu, seragam, dan bervolume tonase besar setiap hari, laboratorium kimia SMA memiliki karakteristik timbulan limbah yang bersifat mikro, sporadis-musiman mengikuti kalender akademik kurikulum, namun sangat heterogen dalam komposisi kimianya (Sulman & Irawan, 2016; Sidik & Damanhuri, 2012). Dalam satu tahun ajaran, sebuah laboratorium SMA rata-rata hanya menghasilkan beberapa liter limbah cair campuran asam-basa dan kation logam. Ironisnya, PP No. 22 Tahun 2021 menerapkan pendekatan pukul rata dan sama sekali tidak mengenal rezim diferensiasi atau relaksasi norma bagi penghasil limbah skala sangat kecil (*Very Small Quantity Generators* / VSQG) maupun pengecualian bersyarat untuk institusi pendidikan menengah. Sebagai perbandingan hukum, Environmental Protection Agency (EPA) di Amerika Serikat melalui *Resource Conservation and Recovery Act* (RCRA) telah lama mengadopsi regulasi khusus bagi penghasil limbah skala sangat kecil (yang menghasilkan kurang dari 100 kilogram limbah berbahaya per bulan) serta aturan khusus laboratorium akademik (Subpart K), yang membebaskan institusi pendidikan dari beban perizinan penyimpanan dan pelaporan setara industri manufaktur sepanjang memenuhi standar pengelolaan dasar yang disederhanakan (U.S. EPA, 2008; Monz & McDonough, 2006; Gutierrez, 2026). Absennya klasifikasi VSQG dalam PP No. 22 Tahun 2021 menyebabkan sekolah menengah di Indonesia dipaksa memikul beban birokrasi perizinan berusaha (yang secara administratif mustahil diakses oleh sekolah negeri karena ketiadaan Nomor Induk Berusaha/NIB komersial) serta beban teknis setara korporasi.

Asimetri regulasi vertikal di bidang lingkungan hidup tersebut diperparah oleh disharmoni horizontal dengan regulasi di sektor pendidikan nasional. Di satu sisi, melalui instrumen regulasi Standar Nasional Pendidikan—khususnya Peraturan Menteri Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi mengenai Standar Sarana dan Prasarana serta Standar Proses—negara mewajibkan setiap SMA untuk menyelenggarakan pembelajaran sains berbasis praktikum di laboratorium kimia dan menjadikan ketersediaan ruang laboratorium beserta reagen kimia sebagai indikator penilaian akreditasi sekolah (Permendikbudristek No. 22 Tahun 2023; rujukan historis spesifikasi ruang laboratorium kimia SMA: Permendiknas No. 24 Tahun 2007 yang telah dicabut). Namun di sisi lain, regulasi sarana dan prasarana pendidikan tersebut sama sekali buta terhadap norma PP No. 22 Tahun 2021; desain standar laboratorium SMA yang ditetapkan kementerian pendidikan hanya mencantumkan fasilitas bak cuci (wastafel) dengan saluran pembuangan air biasa serta tempat sampah domestik tanpa mewajibkan pembangunan TPS Limbah B3 atau instalasi pengolahan air limbah (IPAL) laboratorium. Lebih jauh lagi, dari aspek hukum keuangan negara dan administrasi daerah, pendanaan operasional sekolah menengah bertumpu pada Dana Bantuan Operasional Satuan Pendidikan (BOSP/BOS Reguler) yang diatur melalui Permendikbudristek No. 63 Tahun 2022 tentang Petunjuk Teknis Pengelolaan Dana Bantuan Operasional Satuan Pendidikan sebagaimana diubah dengan Permendikbudristek No. 63 Tahun 2023, yang kini telah dicabut dan digantikan oleh Permendikdasmen No. 8 Tahun 2025, lalu digantikan lagi oleh Permendikdasmen No. 8 Tahun 2026. Struktur komponen penggunaan Dana BOS dirancang secara limitatif untuk membiayai pengadaan bahan habis pakai praktikum dan pemeliharaan ringan sarana sekolah, namun tidak menyediakan pos anggaran khusus maupun dasar hukum bagi Kepala Sekolah untuk mengikat kontrak jasa komersial berbiaya tinggi dengan perusahaan transporter dan pengolah Limbah B3 berizin (yang umumnya mematok tarif jutaan rupiah per pengangkutan dengan syarat kuota berat minimum). Apabila Kepala Sekolah

memaksakan pembayaran kontrak pengolahan limbah industri yang tidak proporsional tersebut dari Dana BOS, tindakan itu justru berisiko menjadi temuan ketidakpatuhan administrasi keuangan daerah oleh inspektorat atau Badan Pemeriksa Keuangan (BPK). Dalam kacamata teori perundang-undangan dan hukum administrasi negara, situasi di mana dua rezim regulasi sektoral saling mengunci subjek hukum ke dalam posisi serba salah ini merupakan bentuk ketidakwajaran regulasi yang melanggar asas lex non cogit ad impossibilia. Anggaran sekolah tidak dirancang untuk menanggungnya.

Meskipun ketidakpatuhan sekolah terhadap standar pengelolaan Limbah B3 berakar pada cacat desain regulasi dan keterbatasan struktural-anggaran, dogmatika hukum positif tetap melahirkan kerentanan pertanggungjawaban hukum (aansprakelijkheid) yang nyata bagi jajaran pengelola satuan pendidikan. Dalam struktur organisasi SMA—yang diatur melalui regulasi kementerian pendidikan mengenai penugasan guru sebagai Kepala Sekolah serta standar tenaga laboratorium sekolah—terdapat rantai kewenangan dan distribusi tanggung jawab fungsional yang jelas (Permendikbudristek No. 40 Tahun 2021 tentang Penugasan Guru sebagai Kepala Sekolah; Permendiknas No. 26 Tahun 2008 tentang Standar Tenaga Laboratorium Sekolah/Madrasah; keduanya telah dicabut dan digantikan oleh Permendikdasmen No. 7 Tahun 2025 dan Permendikdasmen No. 21 Tahun 2025). Kepala Sekolah memikul tanggung jawab manajerial tertinggi sebagai pemimpin satuan pendidikan sekaligus Kuasa Pengguna Anggaran (pada sekolah negeri) atau pelaksana mandat badan hukum yayasan (pada sekolah swasta) yang berwenang menyediakan sarana keselamatan dan menetapkan kebijakan operasional sekolah. Di bawahnya, Kepala Laboratorium IPA/Kimia memikul tanggung jawab administratif-teknis untuk merencanakan pengadaan bahan kimia, menyusun Prosedur Operasional Standar (SOP) kesehatan dan keselamatan kerja (K3), serta mengelola penyimpanan dan pemusnahan bahan maupun limbah laboratorium, yang dalam pelaksanaannya dibantu oleh Tenaga Laboran. Adapun Guru Mata Pelajaran Kimia bertindak sebagai aktor operasional langsung (*pleger*) yang merancang panduan praktikum, menginstruksikan siswa mereaksikan zat kimia, serta mengarahkan cara penanganan sisa reaksi seusai jam pelajaran.

Berdasarkan distribusi kewenangan tersebut, tindakan laboratorium SMA yang menyimpan limbah reagen berbahaya di pojok ruang persiapan tanpa Persetujuan Lingkungan/Rincian Teknis melebihi batas waktu maksimal, atau membuang limbah logam berat dan asam-basa langsung ke wastafel hingga mengalir ke saluran drainase tanah dan perairan umum, secara normatif bersinggungan langsung dengan tiga rezim sanksi dalam UU PPLH jo. UU Cipta Kerja. Pertama, pada ranah hukum administrasi, Dinas Lingkungan Hidup (DLH) memiliki kewenangan pengawasan untuk menjatuhkan sanksi administratif berupa teguran tertulis hingga paksaan pemerintah (bestuursdwang) kepada institusi sekolah dan Kepala Sekolah selaku pejabat penanggung jawab kegiatan karena menyelenggarakan kegiatan yang menghasilkan Limbah B3 tanpa memenuhi standar teknis penyimpanan dan pengelolaan. Kedua, pada ranah hukum perdata, meskipun skala limbah sekolah bersifat mikro, Pasal 88 UU PPLH sebagaimana diubah dengan UU Cipta Kerja menganut doktrin pertanggungjawaban mutlak (strict liability): setiap orang yang tindakannya, usahanya, dan/atau kegiatannya menggunakan B3 dan/atau menghasilkan Limbah B3 bertanggung jawab mutlak atas kerugian yang terjadi dari usaha dan/atau kegiatannya, sehingga apabila di kemudian hari terbukti secara ilmiah bahwa akumulasi pembuangan limbah laboratorium mencemari sumur warga di sekitar lingkungan sekolah, pertanggungjawaban perdata dapat dimintakan tanpa mensyaratkan pembuktian unsur kesalahan (schuld) .

Ketiga—dan yang paling krusial secara dogmatis—adalah potensi keterjeratan pengelola sekolah dalam rumusan delik pidana lingkungan hidup. Di sini pembedaan formil dan materiil menjadi penentu: ia menentukan siapa yang dapat dijerat dan atas dasar apa. Pasal 103 UU PPLH mengancam pidana bagi setiap orang yang menghasilkan Limbah B3 dan tidak melakukan pengelolaan sebagaimana dimaksud dalam Pasal 59; Pasal 104 mengkriminalisasi pembuangan

limbah dan/atau bahan ke media lingkungan hidup tanpa persetujuan sebagaimana dimaksud dalam Pasal 60 jo. Pasal 61. Keduanya adalah delik formil: keterpenuhan unsurnya tidak mensyaratkan bukti pencemaran aktual, melainkan cukup terbuktinya perbuatan membuang limbah kimia ke saluran tanah/air atau tidak mengelola Limbah B3 sesuai prosedur. Pasal 109—pengganti Pasal 102 yang dihapus UU Cipta Kerja—berdiri di kutub yang berbeda. Ancaman pidananya paling singkat 1 (satu) tahun dan paling lama 3 (tiga) tahun, dengan denda Rp1.000.000.000,00 sampai dengan Rp3.000.000.000,00, tetapi rumusannya mensyaratkan akibat: "yang mengakibatkan timbulnya korban atau kerusakan lingkungan hidup". Syarat akibat yang konstitutif itu menjadikan Pasal 109 delik materiil, bukan delik formil. Pasal 98 dan Pasal 99 juga delik materiil, masing-masing karena kesengajaan dan kealpaan. Konsekuensi praktisnya penting bagi sekolah: jerat pidana yang paling langsung membidik Guru Kimia dan Laboran adalah Pasal 103 dan Pasal 104, sedangkan Pasal 98, Pasal 99, dan Pasal 109 baru bekerja apabila ketidakpatuhan tersebut terbukti menimbulkan korban atau pencemaran. Dalam konstruksi ini, Guru Kimia dan Laboran yang membuang limbah reagen ke wastafel dapat dikualifikasikan sebagai pelaku pelaksana, sementara Kepala Laboratorium dan Kepala Sekolah yang mengetahui adanya timbulan limbah praktikum namun membiarkan ketiadaan prosedur pengelolaan yang sah dapat ditarik ke dalam pertanggungjawaban pidana melalui doktrin kealpaan (*culpa*) atau pembiaran dalam kapasitas jabatannya, terlebih lagi apabila akumulasi limbah tersebut terbukti melampaui baku mutu air tanah dan memenuhi unsur delik materiil pencemaran karena kealpaan sebagaimana diatur dalam Pasal 99 UU PPLH.

Menghadapi konstruksi pertanggungjawaban hukum yang sedemikian represif, penalaran hukum yang adil dan progresif menuntut adanya sintesis dialektis yang menolak dua kutub ekstrem: menolak kriminalisasi buta terhadap pendidik, namun sekaligus menolak pembiaran terhadap pencemaran ekologis di sekolah. Secara teoretis dalam hukum pidana dan hukum administrasi, menjatuhkan sanksi pidana kepada Guru Kimia atau Kepala Sekolah atas ketidakmampuan mereka menyediakan TPS Limbah B3 berstandar industri dan menyewa pihak ketiga berizin merupakan pengingkaran terhadap asas fundamental geen straf zonder schuld (tiada pidana tanpa kesalahan). Ketidakpatuhan sekolah dalam kasus ini bukanlah lahir dari niat jahat (mens rea / dolus) untuk merusak lingkungan demi keuntungan ekonomis sebagaimana kejahatan korporasi, melainkan akibat keadaan memaksa secara struktural dan administratif (administratieve overmacht) serta benturan kewajiban hukum (conflict van plichten), di mana guru diwajibkan oleh negara menjalankan kurikulum praktikum namun tidak dibekali instrumen anggaran dan regulasi sektoral yang memadai oleh negara itu sendiri (Moeljatno, 2002; Remmelink, 2003; Zimmermann, 2014). Kendati demikian, berlindung di balik alasan penghapus pidana semata tidak menyelesaikan masalah ekologis di lapangan, sebab sifat toksik dan karsinogenik dari ion Pb^{2+} atau Cr^{6+} yang dibuang ke wastafel sekolah tetap merusak lingkungan hidup dan mencederai hak konstitusional warga atas lingkungan yang sehat. Oleh karena itu, jalan keluar yuridis yang paling rasional bukanlah dengan memaksa sekolah mematuhi rezim pengendalian limbah di hilir yang mustahil secara fiskal, melainkan dengan memotong rantai kausalitas hukum di hulu. Apabila sejak tahap perancangan kurikulum dan pelaksanaan praktikum, Guru Kimia dan Kepala Laboratorium mensubstitusi reagen berkarakteristik B3 dengan senyawa ramah lingkungan, residu yang dihasilkan tidak lagi memiliki karakteristik beracun, korosif, atau reaktif. Pada titik itu objek normatif Limbah B3 memang hilang, dan kewajiban pengelolaan yang mustahil dipenuhi itu tidak lagi melekat pada sekolah. Namun klaim tersebut hanya sah untuk praktikum yang reagennya tersubstitusi penuh. Untuk topik yang masih membutuhkan ion logam transisi—elektrokimia, misalnya—reduksi skala mikro hanya menekan volume dan risiko paparan; residunya tetap Limbah B3 menurut PP No. 22 Tahun 2021 dan tetap wajib dikelola serta diserahkan kepada pengelola berizin. Di situlah letak batas antara solusi yang sudah tersedia secara *de lege lata* dan reformasi yang masih harus diperjuangkan secara *de lege ferenda*.

3.2. Transformasi Praktikum Kimia SMA melalui Green Chemistry: Substitusi Reagen dan Microscale Chemistry

Pengajaran ilmu kimia di Sekolah Menengah Atas (SMA) bertumpu pada integrasi tiga level representasi pemikiran kimia, yang meliputi level makroskopis (fenomena empiris yang dapat diamati secara indrawi melalui eksperimen), level submikroskopis (dinamika partikel, atom, ion, dan interaksi antarmolekul), serta level simbolik (persamaan reaksi kimia, rumus stoikiometri, dan perhitungan matematis) (Johnstone, 1991; Talanquer, 2011). Dalam arsitektur Kurikulum Nasional di Indonesia—baik pada struktur Kurikulum 2013 maupun Capaian Pembelajaran Kimia Fase E (Kelas X) dan Fase F (Kelas XI dan XII) dalam Kurikulum Merdeka—kegiatan praktikum laboratorium dirancang sebagai instrumen verifikasi dan inkuiri ilmiah yang wajib dilaksanakan untuk menjembatani abstraksi konsep submikroskopis-simbolik dengan realitas makroskopis. Melalui kegiatan laboratorium, peserta didik dituntut untuk mengamati dan menganalisis secara langsung perubahan entalpi pada termokimia, pengaruh konsentrasi dan suhu terhadap laju reaksi, pergeseran arah kesetimbangan kimia berdasarkan asas Le Chatelier, kurva titrasi asam-basa, pembentukan endapan pada stoikiometri dan hasil kali kelarutan (Ksp), hingga beda potensial listrik pada sel volta dan reaksi redoks. Keberadaan praktikum basah karena itu merupakan keniscayaan kurikuler. Ia tidak dapat dihapus tanpa meruntuhkan kompetensi keterampilan proses sains peserta didik.

Akan tetapi, apabila tuntutan kurikulum tersebut dibenturkan dengan realitas prosedur praktikum konvensional yang selama puluhan tahun terdistribusi dalam berbagai buku teks dan Lembar Kerja Peserta Didik (LKPD) kimia SMA, terungkap bahwa pemilihan reagen dan skala volume reaksi masih terjebak pada paradigma kimia klasik yang mengabaikan aspek toksikologi lingkungan dan keselamatan kerja (Widiasri dkk., 2026; Aldiansyah dkk., 2025; Sukmawardani & Hardiyanti, 2017). Sebagian besar panduan praktikum konvensional menginstruksikan penggunaan reagen dalam skala makro (*macroscale*), yakni menggunakan tabung reaksi standar berkapasitas 10–20 mL atau gelas kimia (*beaker glass*) berkapasitas 50–250 mL dengan konsentrasi larutan berkisar antara 0,1 M hingga 1,0 M, serta memilih senyawa logam berat transisi semata-mata karena kontras warna produk reaksinya yang mencolok secara visual. Sebagai contoh konkret pertama, dalam praktikum hukum dasar kimia (Hukum Kekekalan Massa Lavoisier), stoikiometri reaksi pengendapan, dan kelarutan (K_{sp}), prosedur standar hampir selalu menggunakan reaksi metatesis (pertukaran ganda) antara larutan timbal(II) nitrat atau timbal(II) asetat dengan kalium iodida maupun kalium kromat menurut persamaan reaksi:

$$Pb(NO_3)_2(aq)+2KI(aq)\rightarrow PbI_2(s)\downarrow +2KNO_3(aq)$$

$$Pb(CH_3COO)_2(aq)+K_2CrO_4(aq)\rightarrow PbCrO_4(s)\downarrow +2CH_3COOK(aq)$$

Meskipun pembentukan endapan kuning cerah PbI_2 dan $PbCrO_4$ sangat efektif memvisualisasikan konsep pereaksi pembatas dan pembentukan fase padat, reaksi ini melepaskan kation timbal divalen (Pb^{2+}) dan anion kromat (CrO_4^{2-}) ke dalam limbah cair. Secara biokimiawi dan toksikologis, ion Pb^{2+} merupakan agen neurotoksik dan hematotoksik persisten yang mampu menginhibisi enzim delta-aminolevulinic acid dehydratase (ALAD) dan ferrochelatase dalam jalur biosintesis heme darah serta merusak sistem saraf pusat, sedangkan spesies kromium heksavalen (Cr^{6+}) dalam ion kromat diklasifikasikan oleh International Agency for Research on Cancer (IARC) sebagai karsinogen Grup 1 pada manusia karena kemampuannya menembus membran sel melalui kanal transpor sulfat (SO_4^{2-}) dan mengalami reduksi intraseluler menjadi Cr^{3+} sembari memicu pembentukan radikal bebas yang memutus untai DNA (IARC, 2012; Zhitkovich, 2011; Flora dkk., 2012).

Patologi toksikologis serupa ditemukan secara masif pada modul praktikum kesetimbangan kimia, laju reaksi, dan termokimia konvensional. Dalam eksperimen pergeseran kesetimbangan kimia berdasarkan asas Le Chatelier, panduan praktikum SMA secara luas menggunakan sistem kesetimbangan ion kromat-dikromat dalam suasana asam-

basa atau kesetimbangan pembentukan ion kompleks kobalt(II) klorida menurut persamaan reaksi:

$$2CrO_4^{2-}(aq)\ [kuning]+2H^+(aq) \rightleftharpoons Cr_2O_7^{2-}(aq)\ [jingga]+H_2O(l)$$

$$[Co(H_2O)_6]^{2+}(aq)\ [merah\ muda]+4Cl^-(aq) \rightleftharpoons [CoCl_4]^{2-}(aq)\ [biru]+6H_2O(l)$$

Selain melibatkan Cr^{6+} yang karsinogenik, penggunaan kation kobalt (Co^{2+}) yang dikombinasikan dengan asam klorida (HCl) pekat sebagai sumber ion Cl^- menghasilkan limbah logam berat yang bersifat toksik akut maupun kronis bagi organisme akuatik serta limbah asam sangat korosif. Sementara itu, pada praktikum penentuan orde laju reaksi pengaruh konsentrasi dan suhu, prosedur standar mengandalkan reaksi antara natrium tiosulfat ($Na_2S_2O_3$) dengan asam klorida (HCl) yang mengamati waktu tertutupnya tanda silang di dasar gelas kimia akibat pembentukan koloid belerang:

$$Na_2S_2O_3(aq)+2HCl(aq) \rightarrow 2NaCl(aq)+SO_2(g)\uparrow +S(s)\downarrow +H_2O(l)$$

Pelaksanaan reaksi ini dalam gelas kimia terbuka sebanyak 50 mL per percobaan secara simultan melepaskan gas belerang dioksida (SO_2) yang bersifat toksik inhalasi dan memicu bronkokonstriksi (serangan asma akut) bagi siswa di ruang laboratorium yang minim *fume hood* (lemari asam), serta menyisakan suspensi asam korosif. Adapun pada praktikum termokimia reaksi endoterm, penggunaan reaksi antara barium hidroksida oktahidrat ($Ba(OH)_2 \cdot 8H_2O$) dengan amonium tiosianat (NH_4SCN) atau amonium klorida (NH_4Cl) menghasilkan kation barium (Ba^{2+}) terlarut yang bersifat kardiotoksik dan neurotoksik karena memblokir kanal ion kalium pada membran sel otot. Apabila satu angkatan kelas XI dan XII yang terdiri atas lima rombongan belajar (masing-masing delapan kelompok praktikum) menjalankan rangkaian eksperimen makroskopis ini, sebuah laboratorium SMA akan memproduksi puluhan liter efluen cair yang secara kumulatif terkontaminasi logam berat (Pb^{2+}, Cr^{6+}, Co^{2+}, Ba^{2+}, Ag^+, Cu^{2+}) dan asam-basa ekstrem yang memenuhi kualifikasi mutlak Limbah B3 berdasarkan PP No. 22 Tahun 2021.

Jalan keluarnya adalah Green Chemistry (Kimia Hijau), paradigma yang dirumuskan Paul T. Anastas dan John C. Warner (1998), yang harus diadopsi ke dalam desain instruksional laboratorium sekolah (Anastas & Warner, 1998; Cann & Dickneider, 2004; Kitchens dkk., 2006). Secara filosofis dan saintifik, Green Chemistry mendekonstruksi rumus risiko kimia klasik yang menyatakan bahwa Risiko merupakan fungsi dari Bahaya Intrinsik dan Paparan (Risiko=f[Bahaya, Paparan]). Pendekatan pengelolaan keselamatan dan limbah konvensional di hilir hanya berupaya menekan variabel Paparan melalui penggunaan alat pelindung diri (APD), ventilasi, serta instalasi pengolahan limbah (IPAL) yang berbiaya mahal dan rentan mengalami kegagalan sistem. Sebaliknya, Green Chemistry bekerja langsung meminimalisasi hingga meniadakan variabel bahaya intrinsik dari zat kimia yang digunakan sejak tahap perencanaan reaksi. Dari dua belas prinsip Green Chemistry, terdapat enam prinsip kunci yang dapat dioperasionalkan secara langsung untuk mentransformasi laboratorium kimia SMA, yaitu Prinsip ke-1 (Prevention: mencegah timbulnya limbah lebih baik daripada mengolah atau membersihkan limbah setelah terbentuk), Prinsip ke-3 (*Less Hazardous Chemical Syntheses*: merancang metode reaksi yang menggunakan dan menghasilkan zat dengan toksisitas rendah atau nol terhadap kesehatan manusia dan lingkungan), Prinsip ke-5 (*Safer Solvents and Auxiliaries*: menggunakan pelarut dan bahan pembantu yang paling aman seperti air), Prinsip ke-7 (*Use of Renewable Feedstocks*: memanfaatkan bahan baku terbarukan dari ekstrak bahan alam atau bahan rumah tangga), Prinsip ke-10 (*Design for Degradation*: menggunakan bahan kimia yang produk akhirnya mudah terurai menjadi zat tidak berbahaya di alam), serta Prinsip ke-12 (*Inherently Safer Chemistry for Accident Prevention*: memilih wujud dan jenis zat yang meminimalkan potensi kecelakaan kerja seperti ledakan, kebakaran, dan paparan gas beracun).

Instrumen operasional pertama dari keenam prinsip Green Chemistry tersebut dalam konteks kurikulum kimia SMA adalah substitusi reagen berbahaya (*reagent substitution*) dengan senyawa ramah lingkungan (*benign reagents*) yang memiliki ekuivalensi mekanisme reaksi. Objek yang dipelajari siswa pada praktikum kimia dasar bukanlah identitas kation logam berat tertentu, melainkan fenomena termodinamika, kinetika, dan kesetimbangan yang melatarbelakanginya. Yang dipelajari adalah fenomenanya, bukan logamnya. Oleh sebab itu, pada praktikum stoikiometri pengendapan, pereaksi pembatas, dan hasil kali kelarutan (K_{sp}), penggunaan reagen beracun $Pb(NO_3)_2$ dan K_2CrO_4 dapat disubstitusi sepenuhnya menggunakan reaksi antara larutan kalsium klorida ($CaCl_2$) dan natrium karbonat (Na_2CO_3) menurut persamaan reaksi:

$$CaCl_2(aq)+Na_2CO_3(aq)\rightarrow CaCO_3(s)\downarrow +2NaCl(aq)$$

Reaksi ini menghasilkan endapan putih kalsium karbonat ($CaCO_3$, komponen utama batu kapur/kalsit dengan $K_{sp} \approx 3{,}36\times10^{-9}$ pada 25°C) yang mengendap secara kuantitatif dan dapat disaring, dikeringkan, serta ditimbang oleh siswa untuk membuktikan Hukum Kekekalan Massa maupun menghitung persentase hasil secara presisi. Keunggulan mutlak dari substitusi ini terletak pada profil produk akhirnya: padatan $CaCO_3$ merupakan mineral alami nontoksik dan filtrat cairnya hanyalah larutan natrium klorida (NaCl, garam dapur) yang sama sekali bukan merupakan Limbah B3. Demikian pula pada praktikum pergeseran kesetimbangan kimia (Asas Le Chatelier), sistem kromat-dikromat (Cr^{6+}) dan kompleks kobalt(II) (Co^{2+}) dapat digantikan oleh kesetimbangan asam-basa senyawa antosianin alami (misalnya dari ekstrak mahkota bunga telang/*Clitoria ternatea* atau kubis ungu/*Brassica oleracea*) maupun kesetimbangan pembentukan kompleks besi(III) tiosianat (Fe3+/SCN−) pada konsentrasi sangat encer (0,001–0,002 M). Pilihan kedua itu tidak sepenuhnya bebas limbah: ion tiosianat bukan senyawa organik terbiodegradasi, dan residunya tidak boleh dicampur dengan limbah asam pengoksidasi kuat karena berpotensi melepaskan gas sianida. Antosianin karena itu diposisikan sebagai substitusi primer, sedangkan Fe3+/SCN− skala tetes adalah alternatif sekunder yang tetap memerlukan penanganan residu. Pada sistem antosianin, penambahan ion H^+ (dari asam sitrat atau asam asetat encer) dan ion OH^- (dari larutan natrium bikarbonat) secara reversibel menggeser kesetimbangan struktur molekul antara kation flavilium (merah), basa kuinonoidal (ungu/biru), dan kalkon/pseudobasa karbinol (hijau/kuning), sehingga siswa dapat mengamati pergeseran arah kesetimbangan secara dramatis dengan tingkat toksisitas limbah bernilai nol (Kanda dkk., 1995; Nyasulu & Barlag, 2011; Mitarlis dkk., 2018).

Substitusi reagen berbasis kimia hijau juga menunjukkan efektivitas saintifik yang tinggi ketika diterapkan pada praktikum kinetika laju reaksi dan termokimia. Untuk mengeliminasi emisi gas beracun SO_2 dari reaksi $Na_2S_2O_3$+HCl, pengukuran laju reaksi sebagai fungsi konsentrasi dan suhu dapat dialihkan ke eksperimen "Reaksi Jam Iodin Vitamin C" (*Vitamin C Iodine Clock Reaction*) yang memanfaatkan asam askorbat (Vitamin C, $C_6H_8O_6$), tingtur iodin (I_2/KI medis), hidrogen peroksida (H_2O_2 3%), dan indikator amilum (pati kanji). Dalam sistem reaksi bersusun ini, terjadi dua tahapan reaksi redoks yang berkompetisi secara kinetik:

$$\text{Tahap 1 (Cepat): } I_2(aq)+C_6H_8O_6(aq)\rightarrow 2I^-(aq)+2H^+(aq)+C_6H_6O_6(aq)$$

$$\text{Tahap 2 (Lambat): } 2I^-(aq)+H_2O_2(aq)+2H^+(aq)\rightarrow I_2(aq)+2H_2O(l)$$

Selama asam askorbat masih tersedia di dalam larutan, molekul I_2 yang terbentuk dari oksidasi I^- oleh H_2O_2 akan segera direduksi kembali menjadi ion I^- yang tidak berwarna. Begitu seluruh mol asam askorbat habis bereaksi (sebagai pereaksi pembatas), kelebihan molekul I_2 langsung berikatan dengan amilum membentuk kompleks amilum-iodin berwarna biru-hitam pekat secara seketika. Perubahan warna yang tajam ini bahkan memberikan akurasi pengukuran waktu reaksi (Δt) yang jauh lebih objektif dibandingkan pengamatan subjektif kekeruhan koloid belerang, sembari menghasilkan residu akhir berupa air, asam dehidroaskorbat, dan iodida encer yang aman bagi lingkungan (Wright & Reedy, 2002; Kerr dkk., 2019). Selanjutnya, pada praktikum termokimia untuk mengamati perubahan entalpi

reaksi endoterm ($\Delta H>0$) dan eksoterm ($\Delta H<0$), penggunaan garam barium ($Ba(OH)_2$) dan asam-basa mineral pekat dapat disubstitusi dengan reaksi endoterm antara asam sitrat ($H_3C_6H_5O_7$) dan natrium bikarbonat ($NaHCO_3$, soda kue):

$$H_3C_6H_5O_7(aq)+3NaHCO_3(aq)\rightarrow Na_3C_6H_5O_7(aq)+3H_2O(l)+3CO_2(g)\uparrow (\Delta H>0)$$

serta proses pelarutan eksoterm kalsium klorida anhidrat ($CaCl_2$) dalam air yang melepaskan kalor secara signifikan ($\Delta H_{sol} \approx -81{,}3$ kJ/mol). Seluruh reagen tersebut merupakan bahan berderajat pangan (*food-grade*) atau senyawa garam mineral benigna yang produk reaksinya berupa larutan natrium sitrat dan kalsium klorida encer tanpa menyisakan ancaman bahaya korosif maupun toksik.

Kendati substitusi reagen mampu menyelesaikan sebagian besar permasalahan toksisitas pada topik kimia dasar, terdapat beberapa topik spesifik dalam kurikulum SMA—seperti deret volta dan sel galvani ($Zn \mid Zn^{2+} // Cu^{2+} \mid Cu$), analisis gugus fungsi senyawa karbon, serta identifikasi kation-anion tertentu—di mana kation logam transisi (seperti Cu^{2+} atau Ag^{+}) secara teoretis tidak dapat digantikan oleh bahan organik rumah tangga karena berkaitan langsung dengan konfigurasi elektron orbital-d dan nilai potensial reduksi standar (E°). Untuk mengatasi residu pada kelompok praktikum yang tidak dapat disubstitusi penuh ini, diterapkan instrumen kedua yaitu reduksi skala praktikum menjadi skala mikro (*microscale* chemistry atau small-scale chemistry). Pendekatan *microscale* chemistry merombak arsitektur peralatan laboratorium dari penggunaan gelas kimia dan tabung reaksi bervolume puluhan mililiter menjadi penggunaan pelat tetes polimer/porselen (24-well atau 96-well microplates), pipet tetes plastik (*Pasteur pipettes*), lembaran plastik mika transparan (*reaction mats*), spuit injeksi medis (syringe 1–5 mL) untuk reaksi fase gas tertutup, serta potongan kertas saring berdimensi kecil sebagai media jembatan garam dan ruang elektrolit (Singh dkk., 1999; Listyarini dkk., 2019; Ratnasari dkk., 2019).

Transisi ke microscale memangkas massa polutan secara eksponensial. Dalam praktikum sel volta konvensional ($Zn(s)+CuSO_4(aq)\rightarrow ZnSO_4(aq)+Cu(s)$), satu kelompok siswa umumnya membutuhkan 50 mL larutan $CuSO_4$ 0,5 M dan 50 mL larutan $ZnSO_4$ 0,5 M. Jumlah itu setara 0,025 mol ion Cu^{2+}, atau 1,588 gram tembaga murni dan 6,242 gram $CuSO_4{\cdot}5H_2O$ per kelompok. Dengan teknik microscale radial electrochemistry di atas kertas saring pada cawan petri atau microplate, siswa cukup meneteskan 2 tetes (≈0,1 mL) larutan $CuSO_4$ 0,1 M pada lempeng tembaga dan 2 tetes larutan $ZnSO_4$ 0,1 M pada lempeng seng, dihubungkan oleh tetesan $NaNO_3$ atau NaCl. Voltmeter digital tetap menampilkan potensial sel ($E_{sel} \approx +1{,}10$ V) dengan akurasi identik. Jumlah zatnya turun menjadi 1×10^{-5} mol Cu^{2+}, setara 0,635 miligram tembaga—pengurangan timbulan limbah sebesar 99,96%. Residu Cu^{2+} itu terjerap di dalam matriks serat selulosa kertas saring, atau cukup direaksikan dengan satu tetes Na_2CO_3 di lubang pelat tetes. Endapan yang terbentuk adalah tembaga(II) karbonat basa, $Cu_2(OH)_2CO_3$, bukan $CuCO_3$ sederhana; keduanya sukar larut, tetapi yang perlu ditegaskan adalah status hukumnya. Mengubah fase Cu^{2+} dari larutan menjadi endapan padat tidak menghilangkan sifat B3 logam berat tersebut. Kertas saring dan endapan itu tetap Limbah B3 yang harus diseka, dimasukkan ke botol residu padat tertutup, dan diserahkan melalui skema pengumpulan kolektif. Botol 250 mL tersebut tidak akan penuh dalam satu tahun ajaran, tetapi harus dikosongkan dan diserahkan paling lambat setiap 365 hari agar tetap patuh pada Pasal 296 PP No. 22 Tahun 2021. Tidak ada satu tetes pun efluen logam berat cair yang perlu dibuang ke wastafel sekolah.

Untuk memetakan secara komprehensif transformasi prosedur laboratorium dari metode konvensional yang berisiko melanggar hukum lingkungan menuju metode Green Chemistry dan *microscale* chemistry, perbandingan parameter reaksi, klasifikasi bahaya berdasarkan Globally Harmonized System (GHS), kualifikasi Limbah B3 menurut PP No. 22 Tahun 2021, serta profil residu hasil substitusi disajikan dalam matriks pada Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Matriks Komparasi Transformasi Praktikum Kimia SMA Konvensional Menuju Green Chemistry dan Microscale Chemistry

Topik Kurikulum & Capaian Pembelajaran	Prosedur & Persamaan Reaksi Konvensional (Skala Makro: 10-50 mL)	Karakteristik Bahaya (GHS) & Kualifikasi Limbah B3 (PP No. 22/2021)	Transformasi Green Chemistry & Microscale (Skala Mikro: 0,1-2 mL)	Persamaan Reaksi Alternatif & Status Hukum Residu Akhir
1. Hukum Dasar Kimia, Stoikiometri & Hasil Kali Kelarutan (K_{sp}) (Pembuktian Hukum Lavoisier, pereaksi pembatas, dan reaksi pengendapan)	Reaksi pengendapan timbal(II) nitrat dengan kalium iodida atau kalium kromat: $Pb(NO_3)_2(aq)+2KI(aq)\rightarrow PbI_2(s)\downarrow +2KNO_3(aq)$	**Sangat Beracun & Karsinogenik:** Ion Pb^{2+} (neurotoksik, reproduktif toksik Kategori 1A, akuatik kronis 1); CrO_4^{2-} (karsinogenik 1A, mutagenik 1B). Status PP 22/2021: Limbah B3 mutlak (Kode A106d; melampaui baku mutu TCLP Pb & Cr).	**Substitusi Reagen Penuh:** Mengganti garam timbal dan kromat dengan reaksi pengendapan kalsium klorida ($CaCl_2$) dan natrium karbonat (Na_2CO_3) pada skala mikro/semi-mikro (2–5 mL). $CaCl_2(aq)+Na_2CO_3(aq)\rightarrow CaCO_3(s)\downarrow +2NaCl(aq)$	**Status Residu:** Non-Limbah B3. Endapan berupa kapur ($CaCO_3$) dan filtrat berupa garam dapur (NaCl) yang aman bagi lingkungan.
2. Kesetimbangan Kimia (Pergeseran arah kesetimbangan berdasarkan Asas Le Chatelier karena perubahan konsentrasi ion & suhu)	Kesetimbangan ion kromat-dikromat atau kompleks kobalt(II) klorida dengan HCl pekat: $2CrO_4^{2-}(aq)+2H^+(aq)\rightleftharpoons Cr_2O_7^{2-}(aq)+H_2O(l)$ $[Co(H_2O)_6]^{2+}(aq)+4Cl^-(aq)\rightleftharpoons [CoCl_4]^{2-}(aq)+6H_2O(l)$	**Karsinogenik, Toksik & Korosif:** Spesiasi Cr^{6+} karsinogenik; ion Co^{2+} karsinogenik/toksik akuatik; HCl pekat sangat korosif (pH≤2). Status PP 22/2021: Limbah B3 karakteristik beracun dan korosif.	**Substitusi Bahan Alam & Microscale:** Menggunakan kesetimbangan asam-basa reversibel pigmen antosianin (*Clitoria ternatea* / *Brassica oleracea*) dengan asam sitrat dan $NaHCO_3$ pada pelat tetes (0,2 mL), atau sistem Fe^{3+}/SCN^- sangat encer (0,001 M). AH^+ (merah)$+OH^-\rightleftharpoons$ A (ungu)$+H_2O$; A (ungu)$+OH^-\rightleftharpoons A^-$ (biru/hijau) $Fe^{3+}(aq)+SCN^-(aq)\rightleftharpoons [Fe(SCN)]^{2+}(aq)$	**Status Residu:** Non-Limbah B3 pada sistem antosianin (organik terbiodegradasi). Pada opsi Fe^{3+}/SCN^-, residu tiosianat bukan limbah organik terbiodegradasi; simpan terpisah dari limbah asam pengoksidasi dan serahkan melalui pengumpulan kolektif.
3. Kinetika Kimia / Laju Reaksi (Pengaruh konsentrasi dan suhu terhadap laju reaksi)	Reaksi natrium tiosulfat dengan asam klorida dalam gelas kimia terbuka (50 mL): $Na_2S_2O_3(aq)+2HCl(aq)\rightarrow 2NaCl(aq)+SO_2(g)\uparrow +S(s)\downarrow +H_2O(l)$	**Toksik Inhalasi & Korosif:** Emisi gas SO_2 beracun dan mengiritasi saluran pernapasan; sisa larutan bersifat asam korosif. Status PP 22/2021: Pencemaran udara ruang lab & efluen cair korosif.	**Substitusi Reagen (Vitamin C Iodine Clock):** Mereaksikan asam askorbat (Vitamin C), tingtur iodin (I_2/KI), H_2O_2 3%, dan indikator amilum pada skala 2–5 mL, atau dekomposisi H_2O_2	**Status Residu:** Non-Limbah B3 (bebas emisi gas beracun, larutan akhir netral/aman).

Topik Kurikulum & Capaian Pembelajaran	Prosedur & Persamaan Reaksi Konvensional (Skala Makro: 10-50 mL)	Karakteristik Bahaya (GHS) & Kualifikasi Limbah B3 (PP No. 22/2021)	Transformasi Green Chemistry & Microscale (Skala Mikro: 0,1-2 mL)	Persamaan Reaksi Alternatif & Status Hukum Residu Akhir
			dengan katalis ekstrak kentang (katalase). $I_2(aq)+C_6H_8O_6(aq)\rightarrow 2I^-(aq)+2H^+(aq)+C_6H_6O_6(aq)$ $2I^-(aq)+H_2O_2(aq)+2H^+(aq)\rightarrow I_2(aq)+2H_2O(l)$	
4. Termokimia (Penentuan perubahan entalpi reaksi eksoterm ΔH<0 dan endoterm ΔH>0)	Reaksi endoterm barium hidroksida dengan amonium tiosianat/klorida ; netralisasi asam mineral pekat: $Ba(OH)_2 \cdot 8H_2O(s)+2NH_4SCN(s)\rightarrow Ba(SCN)_2(aq)+2NH_3(g)+10H_2O(l)$	**Toksik Akut & Korosif:** Ion Ba^{2+} terlarut sangat beracun (kardiotoksik); pelepasan gas amonia (NH_3) iritan/korosif. Status PP 22/2021: Limbah B3 karakteristik beracun (melampaui TCLP Barium) dan korosif.	**Substitusi Reagen Food-Grade:** Reaksi endoterm antara asam sitrat ($H_3C_6H_5O_7$) dengan natrium bikarbonat ($NaHCO_3$); pelarutan eksoterm kalsium klorida anhidrat ($CaCl_2$) dalam kalorimeter skala kecil (10 mL). $H_3C_6H_5O_7(aq)+3NaHCO_3(aq)\rightarrow Na_3C_6H_5O_7(aq)+3H_2O(l)+3CO_2(g)$ $CaCl_2(s) + H_2O(l) \rightarrow Ca^{2+}(aq) + 2Cl^-(aq)$ (ΔH<0)	**Status Residu:** Non-Limbah B3 (larutan garam sitrat dan kalsium klorida netral).
5. Titrasi Asam-Basa & Indikator (Penentuan konsentrasi asam/basa dan kurva pH)	Titrasi buret makro (25–50 mL) menggunakan HCl / H_2SO_4 dan NaOH dengan indikator sintetis fenolftalein (dalam pelarut etanol) dan metil jingga.	**Korosif & Karsinogenik Tersangka:** Volume limbah asam/basa berlebih berpotensi korosif jika tidak dinetralkan; serbuk fenolftalein pekat berisiko mutagenik/karsinogenik Kategori 1B (GHS).	**Titrasi Tetes (Microscale Drop Titration) & Substitusi Asam Organik:** Titrasi menggunakan pipet tetes terkalibrasi atau syringe 1 mL antara asam asetat (CH_3COOH cuka) / asam sitrat dengan NaOH encer (0,05 M) dan indikator ekstrak bahan alam. $CH_3COOH(aq)+NaOH(aq)\rightarrow CH_3COONa(aq)+H_2O(l)$	**Status Residu:** Non-Limbah B3. Pada titik ekuivalen terbentuk natrium asetat biodegradable dengan reduksi volume limbah hingga 95%.

Topik Kurikulum & Capaian Pembelajaran	Prosedur & Persamaan Reaksi Konvensional (Skala Makro: 10-50 mL)	Karakteristik Bahaya (GHS) & Kualifikasi Limbah B3 (PP No. 22/2021)	Transformasi Green Chemistry & Microscale (Skala Mikro: 0,1-2 mL)	Persamaan Reaksi Alternatif & Status Hukum Residu Akhir
6. Reaksi Redoks & Elektrokimia (Sel Volta) (Pengukuran potensial sel galvani dan deret keaktifan logam)	Sel Daniell dalam dua gelas kimia (50–100 mL) berisi larutan $CuSO_4$, $ZnSO_4$, $Pb(NO_3)_2$, atau $AgNO_3$ 0,5–1,0 M dengan jembatan garam agar-agar KNO_3.	**Ekotoksik Akuatik Akut/Kronis:** Volume besar ion Cu^{2+}, Zn^{2+}, Pb^{2+}, Ag^{+} sangat beracun bagi biota perairan dan mikroorganisme tanah. Status PP 22/2021: Limbah B3 cair logam berat (Kode A106d).	**Microscale Radial Electrochemistry:** Mengeliminasi Pb^{2+}; menggunakan 1–2 tetes (0,05 mL) larutan $CuSO_4$ dan $ZnSO_4$ 0,1 M di atas potongan kecil kertas saring sebagai jembatan elektrolit. $Zn(s)+Cu^{2+}(aq)\rightarrow Zn^{2+}(aq)+Cu(s)$ (E_{sel}° =+1,10 V)	**Status Residu:** Reduksi limbah >99,9%; nol limbah cair. Kertas saring berisi mikrogram ion tetap Limbah B3: disimpan kering dalam botol tertutup dan diserahkan paling lambat 365 hari (Pasal 296 PP No. 22 Tahun 2021).

3.3. Integrasi Green Chemistry ke dalam Regulasi Standar Laboratorium Sekolah sebagai Kepatuhan Hukum Preventif

Dalam doktrin hukum administrasi dan hukum lingkungan modern, efektivitas sebuah rezim regulasi tidak diukur dari seberapa berat ancaman sanksi pidana yang dicantumkan pada bagian ketentuan pidana, melainkan dari kemampuan arsitektur norma tersebut dalam menciptakan kepatuhan hukum secara preventif (*preventive regulatory compliance*) langsung pada sumber aktivitasnya (Ayres & Braithwaite, 1992; Gunningham & Grabosky, 1998; Gunningham dkk., 2003). Prinsip pencegahan pencemaran di hulu (*source reduction*) sesungguhnya telah memiliki pijakan filosofis dan yuridis yang kuat di dalam Undang-Undang Nomor 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup (UU PPLH) sebagaimana diubah dengan Undang-Undang Nomor 6 Tahun 2023 (UU Cipta Kerja), serta Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup (PP No. 22 Tahun 2021), yang menempatkan "Pengurangan Limbah B3" (meliputi substitusi bahan, modifikasi proses, dan penggunaan teknologi ramah lingkungan) sebagai tahap awal dalam hierarki pengelolaan sebelum tahapan penyimpanan, pengumpulan, pengangkutan, dan pengolahan (Pasal 275 huruf b jo. Pasal 283 PP No. 22 Tahun 2021). Akan tetapi, pada tataran normatif tersebut, ketentuan pengurangan Limbah B3 dalam PP No. 22 Tahun 2021 dirumuskan sebatas himbauan teknokratis bagi pelaku usaha industri dan belum diterjemahkan menjadi instrumen hukum sektoral yang mengikat penyelenggaraan laboratorium pendidikan menengah.

Apabila kondisi normatif tersebut diuji dengan realitas empiris tata kelola pendidikan, terlihat bahwa penerapan Green Chemistry dan *microscale* chemistry di Sekolah Menengah Atas (SMA) selama ini masih terjebak dalam ruang lingkup diskresi sukarela. Pelaksanaan praktikum kimia ramah lingkungan sepenuhnya bergantung pada inisiatif personal, literasi ekologis, dan kreativitas masing-masing Guru Kimia atau kelompok Musyawarah Guru Mata Pelajaran (MGMP), tanpa adanya payung hukum yang mewajibkannya di tingkat nasional (Jusniar dkk., 2023; Auliah dkk., 2018; Haritsma & Prodjosantoso, 2025). Ketiadaan norma pengikat dalam Peraturan Menteri Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi (Permendikbudristek) mengenai Standar Sarana dan Prasarana maupun Petunjuk Teknis Pengelolaan Dana Bantuan Operasional Satuan Pendidikan (BOSP) mengakibatkan terjadinya anomali pengadaan barang di sekolah. Melalui sistem informasi pengadaan sekolah (seperti

SIPLah) dan perencanaan anggaran tahunan (ARKAS), sekolah menengah masih memiliki keleluasaan administratif untuk membelanjakan dana negara guna membeli reagen berisiko tinggi—seperti garam timbal ($Pb(NO_3)_2$, $Pb(CH_3COO)_2$), senyawa kromium heksavalen (K_2CrO_4, $K_2Cr_2O_7$), kobalt klorida ($CoCl_2$), barium hidroksida ($Ba(OH)_2$), hingga merkuri atau perak nitrat dalam jumlah berlebih—tanpa adanya mekanisme penyaringan pengadaan ramah lingkungan. Selama keran pengadaan reagen B3 di hulu tetap terbuka lebar sementara saluran pengelolaan limbah di hilir tertutup secara struktural-fiskal, maka satuan pendidikan akan terus mereproduksi siklus pelanggaran hukum lingkungan dari tahun ke tahun.

Oleh karena itu, prinsip Green Chemistry dan microscale chemistry harus ditransformasikan dari sekadar inovasi metode pembelajaran menjadi norma hukum administrasi yang mengikat melalui harmonisasi regulasi lintas kementerian. Ini bukan sekadar anjuran pedagogis. Harmonisasi itu mencakup revisi terhadap regulasi Standar Sarana dan Prasarana Pendidikan Menengah serta regulasi Petunjuk Teknis Dana BOSP. Pelembagaan normatif ini wajib dioperasionalkan melalui tiga instrumen kebijakan di tingkat sekolah. Pertama, penetapan Daftar Larangan dan Pembatasan Pengadaan Reagen Sekolah (Negative and Restricted Chemical List) yang diintegrasikan langsung ke dalam katalog elektronik pengadaan sekolah (ARKAS/SIPLah), di mana senyawa logam berat karsinogenik dan neurotoksik (khususnya senyawa Pb, Cr6+, Hg, Cd, Co, dan Ba) dilarang secara mutlak untuk dibeli menggunakan Dana BOSP pada jenjang SMA dan wajib digantikan oleh daftar reagen ramah lingkungan (Positive Benign List) sebagaimana telah dipetakan pada Tabel 1. Kedua, perombakan standar peralatan minimum laboratorium kimia SMA dari dominasi alat gelas skala makro (macroscale glassware) menuju peralatan microscale chemistry (seperti microplate 24/96 sumuran, pipet tetes terkalibrasi, dan micro-burette berbasis spuit) sebagai syarat pemenuhan instrumen akreditasi sekolah oleh Badan Akreditasi Nasional Pendidikan Anak Usia Dini, Pendidikan Dasar, dan Pendidikan Menengah (BAN-PDM). Ketiga, penetapan Prosedur Operasional Standar (SOP) Praktikum Berbasis Green Chemistry melalui Surat Keputusan Kepala Sekolah yang mengikat Kepala Laboratorium, Guru Kimia, dan Laboran dalam menyusun modul praktikum tahunan.

Institusionalisasi SOP Green Chemistry dan microscale chemistry ke dalam regulasi standar laboratorium sekolah berfungsi sebagai perisai hukum yang menggugurkan konstruksi pertanggungjawaban administratif, perdata, maupun pidana lingkungan bagi pendidik. Perlindungan itu lahir dari prosedur, bukan dari niat baik. Dalam kacamata hukum pidana lingkungan, keterpenuhan delik formil pengelolaan Limbah B3 tanpa izin (Pasal 103 UU PPLH jo. UU Cipta Kerja) maupun delik dumping (Pasal 104 UU PPLH) mensyaratkan adanya unsur objek normatif berupa “Limbah B3” atau “limbah pencemar” serta unsur sifat melawan hukum (*wederrechtelijkheid*). Ketika Guru Kimia dan Kepala Laboratorium menjalankan SOP wajib substitusi reagen pada praktikum stoikiometri, kesetimbangan, laju reaksi, termokimia, dan titrasi asam-basa, reaksi kimia di laboratorium sejak awal hanya menghasilkan residu garam mineral netral (NaCl, $CaCO_3$, $Na_3C_6H_5O_7$) dan senyawa organik terbiodegradasi. Secara ontologis dan yuridis, ketiadaan karakteristik beracun, korosif, dan reaktif pada efluen hasil substitusi tersebut menyebabkan objek yang dibuang ke saluran air sekolah bukan lagi berstatus Limbah B3 menurut PP No. 22 Tahun 2021, sehingga unsur delik dalam Pasal 98, Pasal 99, Pasal 103, dan Pasal 104 UU PPLH gugur sejak di hulu. Pasal 109 tidak perlu dibahas di sini karena delik materiil tersebut menuntut akibat berupa korban atau kerusakan lingkungan, yang justru hendak dicegah oleh SOP ini. Klaim itu berlaku untuk praktikum yang tersubstitusi penuh; residu padat dari praktikum yang tidak dapat disubstitusi tetap Limbah B3 dan tetap wajib diserahkan kepada pengelola berizin. Bagi Kepala Sekolah dan Guru Kimia, kepatuhan penuh dalam mengimplementasikan SOP Green Chemistry dan *zero liquid discharge* pada praktikum microscale merupakan manifestasi nyata dari pelaksanaan asas kecermatan dan kehati-hatian yang patut (*due diligence* / *zorgvuldigheidsbeginsel*), yang

secara doktrinal meniadakan unsur kesalahan maupun kealpaan (*culpa*) pada diri pejabat dan pendidik sekolah (Farhaniatussafana dkk., 2026; Albuquerque, 2024; Moeljatno, 2002).

Meskipun transformasi menuju Green Chemistry dan *microscale* chemistry mampu mengeliminasi lebih dari sembilan puluh sembilan persen timbulan limbah cair berbahaya di laboratorium SMA, sebuah desain kebijakan hukum yang komprehensif tetap harus mengantisipasi dua persoalan residu yang tersisa di bagian hilir. Persoalan pertama adalah akumulasi residu padat berskala mikrogram (seperti potongan kertas saring yang mengimobilisasi ion Cu^{2+} dan Ag^{+} dari praktikum elektrokimia *microscale*) yang disimpan kering di dalam botol penampung tertutup di ruang persiapan laboratorium. Persoalan kedua—yang secara faktual dihadapi oleh hampir seluruh SMA tua di Indonesia saat ini—adalah keberadaan timbunan bahan kimia berbahaya kedaluwarsa (*legacy chemical waste*) warisan pengadaan dekade-dekade sebelumnya yang tersimpan di lemari gudang sekolah dalam kondisi rusak kemasannya, teroksidasi, atau hilang label identifikasinya (Sulman & Irawan, 2016; Lalang dkk., 2022). Berdasarkan PP No. 22 Tahun 2021, baik residu mikrogram logam berat maupun bahan kimia B3 kedaluwarsa tersebut tetap berkualifikasi sebagai Limbah B3 yang tidak boleh disimpan tanpa batas waktu di sekolah dan dilarang keras dikubur di halaman sekolah atau dibuang ke tempat pembuangan sampah domestik.

Untuk menyelesaikan persoalan residu mikro dan bahan kimia kedaluwarsa tersebut tanpa menjerumuskan sekolah ke dalam kemustahilan birokrasi dan anggaran, diperlukan reformasi regulasi lingkungan hidup melalui pembentukan rezim Penghasil Limbah B3 Skala Pendidikan Mikro (Educational Very Small Quantity Generators / Edu-VSQG) yang diintegrasikan dengan Skema Pengumpulan Limbah Kolektif Lintas Instansi (Collective Waste Collection Scheme) di tingkat daerah. Pertama, pada level pemerintah pusat, Kementerian Lingkungan Hidup/Badan Pengendalian Lingkungan Hidup (KLH/BPLH) perlu merevisi Peraturan Menteri LHK Nomor 6 Tahun 2021 untuk mengecualikan laboratorium sekolah menengah (yang menghasilkan Limbah B3 kurang dari ambang batas tertentu, misalnya di bawah 5 kilogram per semester) dari kewajiban memiliki Perizinan Berusaha dan Rincian Teknis TPS Limbah B3 berstandar konstruksi sipil industri, dengan tetap mempertahankan batas waktu penyimpanan paling lama 365 hari sebagaimana Pasal 296 PP No. 22 Tahun 2021. Sebagai gantinya, laboratorium SMA cukup diwajibkan menyediakan lemari penyimpanan khusus berventilasi yang terkunci rapat dengan wadah penampung sekunder anti-bocor dan pelabelan GHS yang terstandarisasi.

Kedua, pada level tata kelola pemerintahan daerah, beban pengangkutan dan pengolahan akhir residu tersebut harus diambil alih oleh negara melalui sinergi kelembagaan antara Dinas Pendidikan dan Dinas Lingkungan Hidup (DLH). Berdasarkan pembagian urusan pemerintahan konkuren dalam Undang-Undang Nomor 23 Tahun 2014 tentang Pemerintahan Daerah, penyelenggaraan pendidikan menengah (SMA dan SMK) merupakan urusan pemerintahan konkuren yang menjadi kewenangan Pemerintah Daerah provinsi (Lampiran UU No. 23 Tahun 2014, Matriks Pembagian Urusan Pemerintahan Bidang Pendidikan). Berpijak pada kewenangan atributif tersebut, Pemerintah Provinsi tidak boleh melepaskan tanggung jawab pengelolaan limbah laboratorium kepada masing-masing kepala sekolah secara atomistik, melainkan wajib membentuk mekanisme pengelolaan kolektif terpusat. Negara harus hadir di hilir. Dalam skema ini, Dinas Pendidikan Provinsi bersama DLH Provinsi menetapkan satu titik pengumpulan sementara regional (regional drop-off hub) atau menyelenggarakan penjemputan terjadwal (milk-run pickup system) setiap tahun ajaran—sebelum tenggat 365 hari terlampaui—yang mengonsolidasikan botol-botol residu microscale dan bahan kimia kedaluwarsa dari seluruh SMA negeri maupun swasta di wilayah kabupaten/kota melalui koordinasi jaringan MGMP Kimia. Seluruh biaya kontrak pengangkutan dan pengolahan limbah dengan pihak ketiga berizin (atau melalui kerja sama resource sharing dengan Unit Pelaksana Teknis Laboratorium Terpadu Perguruan Tinggi Negeri setempat yang telah memiliki IPAL dan izin pengelolaan Limbah B3) dibebankan secara terpusat pada

Anggaran Pendapatan dan Belanja Daerah (APBD) Provinsi melalui Dokumen Pelaksanaan Anggaran (DPA) Dinas Pendidikan atau DLH. Melalui penggabungan volume limbah dari ratusan sekolah ke dalam satu kontrak pengadaan jasa pemerintah daerah, skala keekonomian (economies of scale) akan tercapai secara efisien, hambatan maladministrasi penggunaan Dana BOS di tingkat sekolah dapat dihindari sepenuhnya, dan kepatuhan terhadap hukum lingkungan hidup dapat ditegakkan secara paripurna dari hulu hingga ke hilir.

IV. KESIMPULAN DAN SARAN

4.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis yuridis-normatif dan kajian saintifik pendidikan kimia yang telah diuraikan secara dialektis, penelitian ini menghasilkan tiga kesimpulan utama. Pertama, terdapat disharmoni dan asimetri regulasi yang struktural antara rezim hukum pengelolaan Limbah B3 dalam UU No. 32 Tahun 2009 jo. UU No. 6 Tahun 2023 dan PP No. 22 Tahun 2021 dengan realitas kelembagaan laboratorium kimia SMA. Rezim hukum lingkungan positif Indonesia mengadopsi desain regulasi yang berorientasi industri dan seragam tanpa menyediakan diferensiasi norma bagi penghasil limbah skala sangat kecil (VSQG) di sektor pendidikan menengah. Ketidaksinkronan horizontal ini diperparah oleh regulasi Standar Sarana dan Prasarana Pendidikan serta Petunjuk Teknis Pengelolaan Dana BOSP yang mewajibkan penyelenggaraan praktikum kimia namun tidak mengakomodasi standar konstruksi TPS Limbah B3 maupun alokasi anggaran untuk menyewa jasa pengolah limbah berizin. Akibatnya, jajaran pengelola satuan pendidikan—mulai dari Kepala Sekolah, Kepala Laboratorium, Guru Kimia, hingga Laboran—berada dalam situasi kemustahilan kepatuhan (*lex non cogit ad impossibilia*) yang membuat mereka rentan terjerat sanksi administratif, pertanggungjawaban mutlak (*strict liability*) perdata, hingga delik pidana pengelolaan serta dumping Limbah B3 (Pasal 98, Pasal 99, Pasal 103, Pasal 104, dan Pasal 109 UU PPLH)—dengan Pasal 103 dan Pasal 104 sebagai delik formil, serta Pasal 98, Pasal 99, dan Pasal 109 sebagai delik materiil—meskipun ketidakpatuhan tersebut terjadi akibat keadaan memaksa administratif (*administratieve overmacht*) dan benturan kewajiban hukum (*conflict van plichten*).

Kedua, transformasi prosedur praktikum kimia SMA melalui pendekatan Green Chemistry dan *microscale* chemistry terbukti secara stoikiometris, toksikologis, dan pedagogis mampu memutus rantai pembentukan Limbah B3 tanpa mendistorsi ketercapaian Capaian Pembelajaran dalam kurikulum kimia nasional. Melalui operasionalisasi prinsip pencegahan limbah dan substitusi reagen berbahaya, penggunaan kation logam berat neurotoksik dan karsinogenik (Pb^{2+}, Cr^{6+}, Co^{2+}, Ba^{2+}) serta reaksi penghasil gas beracun (SO_2, NH_3) pada praktikum stoikiometri, hasil kali kelarutan, kesetimbangan kimia, laju reaksi, termokimia, dan titrasi asam-basa dapat digantikan sepenuhnya oleh reagen ramah lingkungan berderajat pangan dan bahan alam (seperti sistem $CaCl_2/Na_2CO_3$, pigmen antosianin, Vitamin C Iodine Clock, serta asam sitrat/$NaHCO_3$) yang menghasilkan residu garam netral dan senyawa organik terbiodegradasi. Sementara itu, untuk topik praktikum elektrokimia yang secara teoretis masih membutuhkan ion logam transisi (Cu^{2+} dan Ag^{+}), penerapan teknik *microscale* chemistry di atas matriks kertas saring dan pelat tetes mampu memangkas massa penggunaan reagen hingga lebih dari 99,9% dan mewujudkan nihil pembuangan limbah cair (*zero liquid discharge*) ke wastafel sekolah.

Ketiga, pelembagaan Green Chemistry ke dalam regulasi standar operasional laboratorium sekolah berfungsi sebagai instrumen kepatuhan hukum preventif (*preventive regulatory compliance*) yang mendekriminalisasi aktivitas pendidikan sains langsung dari sumbernya (*source reduction*). Ketika substitusi reagen dan *microscale* chemistry ditetapkan sebagai standar wajib melalui pemberlakuan daftar larangan pengadaan bahan kimia B3 (Negative List) pada sistem pengadaan sekolah (ARKAS/SIPLah) serta integrasi SOP Kimia Hijau dalam instrumen akreditasi laboratorium, maka residu hasil praktikum kehilangan

karakteristik beracun dan korosifnya sehingga secara yuridis tidak lagi berkualifikasi sebagai Limbah B3 menurut PP No. 22 Tahun 2021, sepanjang reagennya tersubstitusi penuh. Untuk topik yang masih memerlukan ion logam transisi, residu padat tetap Limbah B3 dan tetap wajib diserahkan melalui skema pengumpulan kolektif. Hilangnya objek normatif Limbah B3 dalam praktikum yang tersubstitusi penuh menggugurkan unsur sifat melawan hukum dalam delik lingkungan sekaligus membuktikan pelaksanaan prinsip kehati-hatian (*due diligence*) yang menghapus unsur kesalahan (*culpa*) bagi pendidik. Untuk menangani residu padat skala mikrogram yang tidak tersubstitusi serta timbunan bahan kimia kedaluwarsa (legacy waste), kepatuhan di hulu tersebut disempurnakan di bagian hilir melalui pembentukan skema Pengumpulan Limbah Kolektif Lintas Instansi (*Collective Waste Collection Scheme*) yang dikoordinasikan dan dibiayai secara terpusat oleh Dinas Pendidikan Provinsi bersama Dinas Lingkungan Hidup Provinsi melalui APBD.

4.2. Saran

Guna mewujudkan harmonisasi regulasi dan kepatuhan hukum lingkungan yang berkeadilan di sektor pendidikan menengah, penelitian ini mengajukan tiga rekomendasi kebijakan yang saling mengunci. Pertama, kepada Pemerintah Pusat, khususnya Kementerian Lingkungan Hidup/Badan Pengendalian Lingkungan Hidup (KLH/BPLH) bersama Kementerian Pendidikan Dasar dan Menengah, disarankan untuk segera menyusun Surat Keputusan Bersama (SKB) atau merevisi Peraturan Menteri LHK Nomor 6 Tahun 2021 dan Peraturan Menteri tentang Standar Sarana dan Prasarana Pendidikan guna mengakomodasi klasifikasi khusus Penghasil Limbah B3 Skala Pendidikan Mikro (*Edu-VSQG*). Revisi regulasi pendidikan wajib mengunci Daftar Larangan Pengadaan Reagen B3 Karsinogenik/Logam Berat (Pb, Cr^{6+}, Hg, Cd, Co, Ba) di dalam aplikasi perencanaan anggaran sekolah (ARKAS dan SIPLah) serta menetapkan panduan praktikum berbasis Green Chemistry dan peralatan *microscale* chemistry sebagai indikator wajib dalam akreditasi laboratorium SMA. Kedua, kepada Pemerintah Daerah Provinsi melalui Dinas Pendidikan dan Dinas Lingkungan Hidup, disarankan untuk membentuk program Pengumpulan Limbah Laboratorium Sekolah secara kolektif (milk-run collection system) yang dibiayai melalui APBD Provinsi atau melalui kemitraan dengan UPT Laboratorium Terpadu Perguruan Tinggi setempat, guna mengevakuasi timbunan bahan kimia kedaluwarsa (legacy waste) dan residu mikrogram dari seluruh SMA tanpa membebani Dana BOS masing-masing satuan pendidikan. Ketiga, kepada Kepala Sekolah, Kepala Laboratorium, dan Guru Kimia yang tergabung dalam MGMP Kimia, disarankan untuk segera melakukan audit inventaris bahan kimia di laboratorium masing-masing, menghentikan pembuangan sisa reaksi logam berat ke wastafel, serta merombak seluruh Lembar Kerja Peserta Didik (LKPD) praktikum konvensional menuju protokol substitusi bahan ramah lingkungan dan *microscale* chemistry sebagai langkah perlindungan hukum mandiri bagi profesi pendidik.

DAFTAR PUSTAKA

Albuquerque, B. (2024). The interplay between environmental crime and corporate sustainability due diligence. New Journal of European Criminal Law, 15(2), 209–224. https://doi.org/10.1177/20322844241253182

Aldiansyah, Febry, M., Nurlaili, Hartati, Y., & Usman. (2025). Trial of green chemistry-based chemistry laboratory manual on acid-base indicators. Hydrogen: Jurnal Kependidikan Kimia, 13(6), 1264–1279. https://doi.org/10.33394/hjkk.v13i6.17322

Ali, H., Khan, E., & Ilahi, I. (2019). Environmental chemistry and ecotoxicology of hazardous heavy metals: Environmental persistence, toxicity, and bioaccumulation. Journal of Chemistry, 2019, 1–14. https://doi.org/10.1155/2019/6730305

Allanas, E., Suryani, E., & Affriliani, P. N. (2024). Pengembangan praktikum microscale untuk menganalisis pemahaman prinsip Green Chemistry. JRPK: Jurnal Riset Pendidikan Kimia, 14(2), 75–86. https://doi.org/10.21009/jrpk.142.01

Anastas, P. T., & Warner, J. C. (1998). Green chemistry: Theory and practice. New York: Oxford University Press.

Anisa, D., & Mitarlis. (2020). Pengembangan lembar kerja peserta didik (LKPD) berwawasan green chemistry untuk meningkatkan kemampuan literasi sains peserta didik pada materi larutan elektrolit dan non elektrolit. UNESA Journal of Chemical Education, 9(3), 407–416. https://doi.org/10.26740/ujced.v9n3.p407-416

Auliah, A., Muharram, & Mulyadi. (2018). Indonesian teachers' perceptions on Green Chemistry principles: A case study of a chemical analyst vocational school. Journal of Physics: Conference Series, 1028, 012042. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1028/1/012042

Ayres, I., & Braithwaite, J. (1992). Responsive regulation: Transcending the deregulation debate. New York: Oxford University Press.

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), 977–980. https://doi.org/10.1021/ed081p977

Farhaniatussafana, S. S., Utami, T., Kuan, S. S., Permata, A. E., & Umara, N. S. (2026). The implementation of the due diligence principle in environmental law enforcement: Its impact on corporate criminal liability. Borobudur Law and Society Journal (BLASTAL), 5(5), 79–92. https://journal.unimma.ac.id/blastal/article/view/18100

Flora, G., Gupta, D., & Tiwari, A. (2012). Toxicity of lead: A review with recent updates. Interdisciplinary Toxicology, 5(2), 47–58. https://doi.org/10.2478/v10102-012-0009-2

Gunningham, N., & Grabosky, P. (1998). Smart regulation: Designing environmental policy. Oxford: Clarendon Press.

Gunningham, N., Kagan, R. A., & Thornton, D. (2003). Shades of green: Business, regulation, and environment. Stanford: Stanford University Press.

Gutierrez, M. M. (2026). A systematic approach to hazardous waste management for very small quantity generators. ACS Chemical Health & Safety, 33(5), 756–769. https://doi.org/10.1021/acs.chas.6c00070

Haritsma, & Prodjosantoso, A. K. (2025). Need analysis of green chemistry-based practicum guidelines incorporating local wisdom on redox topic. Indonesian Journal of Chemical Education, 2(1), 34–49. https://doi.org/10.21831/ijce.v2i1.87271

International Agency for Research on Cancer. (2012). Arsenic, metals, fibres, and dusts (IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, Vol. 100C). Lyon: WHO Press. https://publications.iarc.who.int/Book-And-Report-Series/Iarc-Monographs-On-The-Identification-Of-Carcinogenic-Hazards-To-Humans/Arsenic-Metals-Fibres-And-Dusts-2012

Indarwati, D. (2020). Identifikasi bahaya dan risk assessment: Penerapan keselamatan dan kesehatan kerja di laboratorium. Jurnal Pengelolaan Laboratorium Pendidikan, 2(2), 51–57. https://doi.org/10.14710/jplp.2.2.51-57

Johnstone, A. H. (1991). Why is science difficult to learn? Things are seldom what they seem. Journal of Computer Assisted Learning, 7(2), 75–83. https://doi.org/10.1111/j.1365-2729.1991.tb00230.x

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. https://doi.org/10.29303/jppipa.v9i10.4756

Kanda, N., Asano, T., Itoh, T., & Onoda, M. (1995). Preparing “chameleon balls” from natural plants: Simple handmade pH indicator and teaching material for chemical equilibrium. Journal of Chemical Education, 72(12), 1131. https://doi.org/10.1021/ed072p1131

Kerr, R., Thomson, W. M., & Smith, D. J. (2019). Mathematical modelling of the vitamin C clock reaction. Royal Society Open Science, 6(4), 181367. https://doi.org/10.1098/rsos.181367

Kisdiono, T. F., Erwinsyah, & Virgana. (2023). Analisis profil laboratorium kimia sekolah dan aktivitas praktikum kimia di sekolah menengah atas negeri Kabupaten Lebak. Dalton: Jurnal Pendidikan Kimia dan Ilmu Kimia, 6(1), 56–66. https://doi.org/10.31602/dl.v6i1.10428

Kitchens, C., Charney, R., Naistat, D., Farrugia, J., Clarens, A., O’Neil, A., Lisowski, C., & Braun, B. (2006). Completing our education. Green chemistry in the curriculum. Journal of Chemical Education, 83(8), 1126. https://doi.org/10.1021/ed083p1126

Krismen US, Y. (2019). Analisa pertanggungjawaban pidana bagi korporasi dalam tindak pidana lingkungan hidup terhadap penyelesaian akhir limbah medis pada rumah sakit. Bina Hukum Lingkungan, 3(2), 204–217. https://bhl-jurnal.or.id/index.php/bhl/article/view/94

Lalang, A. C., Lestarani, D., Christianto, H., Lawa, Y., Neolaka, Y. A. B., Parera, L. A. M., & Dewi, N. W. O. A. C. (2022). Sosialisasi pengelolaan bahan kimia kadaluarsa dan limbah praktikum bagi guru kimia. SAFARI: Jurnal Pengabdian Masyarakat Indonesia, 2(4), 132–140. https://doi.org/10.56910/safari.v2i4.479

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

Mitarlis, Azizah, U., & Yonatha, B. (2018). Pemanfaatan indikator alam dalam mewujudkan pembelajaran kimia berwawasan green chemistry. Jurnal Penelitian Pendidikan IPA, 3(1), 1–7. https://doi.org/10.26740/jppipa.v3n1.p1-7

Moeljatno. (2002). Asas-asas hukum pidana. Jakarta: Rineka Cipta.

Monz, D. J., & McDonough, F. M. (2006). EPA’s proposed academic laboratories rule: A more flexible approach to the management of hazardous waste. Journal of Chemical Health & Safety, 13(5), 5–8. https://doi.org/10.1016/j.jchas.2006.06.001

Murtihapsari, Rombe, Y. P., Naa, N. M., & Yogaswara, R. (2022). Ulasan: Kajian penerapan model pembelajaran melalui praktikum dari bahan alam. Jurnal Penelitian Pendidikan Kimia: Kajian Hasil Penelitian Pendidikan Kimia, 9(1), 1–9. https://doi.org/10.36706/jppk.v9i1.15375

Nyasulu, F., & Barlag, R. (2011). Colorimetric determination of the iron(III)–thiocyanate reaction equilibrium constant with calibration and equilibrium solutions prepared in a cuvette by sequential additions of one reagent to the other. Journal of Chemical Education, 88(3), 313–314. https://doi.org/10.1021/ed1009927

Putri, Y. E., & Putra, A. Y. (2023). Pengembangan bahan ajar berbasis green chemistry pada materi koloid. Jurnal Inovasi Pendidikan Kimia, 17(2), 124–129. https://doi.org/10.15294/jipk.v17i2.39961

Ratnasari, D., Irwansyah, F. S., & Subarkah, C. Z. (2019). The making KIT micro scale electrolysis experiments using lithium batteries based on green chemistry. Journal of Physics: Conference Series, 1402(5), 055031. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1402/5/055031

Remmelink, J. (2003). Hukum pidana: Komentar atas pasal-pasal terpenting dari Kitab Undang-Undang Hukum Pidana Belanda dan padanannya dalam Kitab Undang-Undang Hukum Pidana Indonesia. Jakarta: Gramedia Pustaka Utama.

Salsabila, S. A., & Hernani. (2025). Trends in integrating green chemistry and sustainability into chemistry education. JTK (Jurnal Tadris Kimiya), 10(1), 45–59. https://doi.org/10.15575/jtk.v10i1.44007

Sentoso, G. G. (2023). Problematika pemenuhan kepatuhan hukum pengelolaan limbah B3 pada industri kabel listrik (studi industri PT "X" di Kota Bandung). Bina Hukum Lingkungan, 8(1), 52–67. https://doi.org/10.24970/bhl.v8i1.241

Shintya Dewi, D. A. K. D., Sastrawidana, D. K., & Wiratini, N. M. (2019). Analisis pengelolaan alat dan bahan praktikum pada laboratorium kimia di SMA Negeri 1 Tampaksiring. Jurnal Pendidikan Kimia Undiksha, 3(1), 37–43. https://doi.org/10.23887/jjpk.v3i1.21162

Sidik, A. A., & Damanhuri, E. (2012). Studi pengelolaan limbah B3 (bahan berbahaya dan beracun) laboratorium di ITB. Jurnal Teknik Lingkungan, 18(1), 12–20. https://doi.org/10.5614/jtl.2012.18.1.2

Sihombing, A. K. (2020). Penegakan hukum terhadap pencemaran lingkungan di Sungai Cikijing, Jawa Barat akibat aktivitas industri tekstil PT. Kahatex. Jurnal Hukum Lingkungan Indonesia, 7(1), 98–117. https://doi.org/10.38011/jhli.v7i1.209

Singh, M. M., Szafran, Z., & Pike, R. M. (1999). Microscale chemistry and green chemistry: Complementary pedagogies. Journal of Chemical Education, 76(12), 1684. https://doi.org/10.1021/ed076p1684

Sukmawardani, Y., & Hardiyanti, R. (2017). Pengembangan lembar kerja berbasis inkuiri untuk analisis kualitatif logam berat pada limbah laboratorium. JTK (Jurnal Tadris Kimiya), 2(2), 153–158. https://doi.org/10.15575/jtk.v2i2.1880

Sulman, L., & Irawan, J. (2016). Pengelolaan limbah kimia di laboratorium kimia PMIPA FKIP Unram. Jurnal Pijar MIPA, 11(2), 135–141. https://doi.org/10.29303/jpm.v11i2.116

Talanquer, V. (2011). Macro, submicro, and symbolic: The many faces of the chemistry "triplet". International Journal of Science Education, 33(2), 179–195. https://doi.org/10.1080/09500690903386435

U.S. Environmental Protection Agency. (2008). 40 CFR Part 262 Subpart K — Alternative requirements for hazardous waste determination and accumulation of unwanted material for laboratories owned by eligible academic entities (73 FR 72954, December 1, 2008). https://www.ecfr.gov/current/title-40/chapter-I/subchapter-I/part-262/subpart-K

Widiasri, P. V. P., Wiratini, N. M., & Muderawan, I. W. (2026). Pengembangan modul praktikum microscale titrasi asam-basa menggunakan small-scale chemistry kit untuk siswa SMA. Dalton: Jurnal Pendidikan Kimia dan Ilmu Kimia, 9(1), 22–36. https://doi.org/10.31602/dl.v9i1.22373

Wright, S. W., & Reedy, P. (2002). The vitamin C clock reaction. Journal of Chemical Education, 79(1), 41–43. https://doi.org/10.1021/ed079p41

Zhitkovich, A. (2011). Chromium in drinking water: Sources, metabolism, and cancer risks. Chemical Research in Toxicology, 24(10), 1617–1629. https://doi.org/10.1021/tx200251t

Zimmer, S. W. (1999). Chemical waste management for the conditionally exempt small quantity generator. Journal of Chemical Education, 76(6), 808. https://doi.org/10.1021/ed076p808

Zimmermann, T. (2014). Justification or excuse? The collision of positive duties in German criminal law. The Journal of Criminal Law, 78(3), 263–276. https://doi.org/10.1350/jcla.2014.78.3.922

PERATURAN PERUNDANG-UNDANGAN

Undang-Undang Dasar Negara Republik Indonesia Tahun 1945.

Undang-Undang Nomor 20 Tahun 2003 tentang Sistem Pendidikan Nasional.

Undang-Undang Nomor 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup.

Undang-Undang Nomor 23 Tahun 2014 tentang Pemerintahan Daerah beserta Lampirannya.
Undang-Undang Nomor 6 Tahun 2023 tentang Penetapan Peraturan Pemerintah Pengganti Undang-Undang Nomor 2 Tahun 2022 tentang Cipta Kerja menjadi Undang-Undang.
Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup beserta Lampiran IX, Lampiran X, dan Lampiran XI.
Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor 6 Tahun 2021 tentang Tata Cara dan Persyaratan Pengelolaan Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun.
Peraturan Menteri Pendidikan Nasional Nomor 24 Tahun 2007 tentang Standar Sarana dan Prasarana untuk Sekolah Dasar/Madrasah Ibtidaiyah (SD/MI), Sekolah Menengah Pertama/Madrasah Tsanawiyah (SMP/MTs), dan Sekolah Menengah Atas/Madrasah Aliyah (SMA/MA) (dicabut dengan Permendikbudristek Nomor 22 Tahun 2023).
Peraturan Menteri Pendidikan Nasional Nomor 26 Tahun 2008 tentang Standar Tenaga Laboratorium Sekolah/Madrasah (dicabut dengan Permendikdasmen Nomor 21 Tahun 2025).
Peraturan Menteri Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi Nomor 40 Tahun 2021 tentang Penugasan Guru sebagai Kepala Sekolah (dicabut dengan Permendikdasmen Nomor 7 Tahun 2025).
Peraturan Menteri Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi Nomor 63 Tahun 2022 tentang Petunjuk Teknis Pengelolaan Dana Bantuan Operasional Satuan Pendidikan sebagaimana diubah dengan Peraturan Menteri Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi Nomor 63 Tahun 2023 (dicabut dengan Permendikdasmen Nomor 8 Tahun 2025).
Peraturan Menteri Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi Nomor 22 Tahun 2023 tentang Standar Sarana dan Prasarana pada Pendidikan Anak Usia Dini, Jenjang Pendidikan Dasar, dan Jenjang Pendidikan Menengah.
Peraturan Menteri Pendidikan Dasar dan Menengah Nomor 7 Tahun 2025 tentang Penugasan Guru sebagai Kepala Sekolah.
Peraturan Menteri Pendidikan Dasar dan Menengah Nomor 8 Tahun 2025 tentang Petunjuk Teknis Pengelolaan Dana Bantuan Operasional Satuan Pendidikan (digantikan oleh Permendikdasmen Nomor 8 Tahun 2026).
Peraturan Menteri Pendidikan Dasar dan Menengah Nomor 21 Tahun 2025 tentang Standar Tenaga Kependidikan pada Pendidikan Anak Usia Dini, Jenjang Pendidikan Dasar, dan Jenjang Pendidikan Menengah.
Peraturan Menteri Pendidikan Dasar dan Menengah Nomor 8 Tahun 2026 tentang Petunjuk Teknis Pengelolaan Dana Bantuan Operasional Satuan Pendidikan.
Keputusan Kepala Badan Standar, Kurikulum, dan Asesmen Pendidikan Nomor 046/H/KR/2025 tentang Capaian Pembelajaran pada Pendidikan Anak Usia Dini, Jenjang Pendidikan Dasar, dan Jenjang Pendidikan Menengah (menggantikan Keputusan Kepala BSKAP Nomor 032/H/KR/2024).