



Pengembangan Model Evaluasi Sistem Penyimpanan Limbah B3 Berbasis Risiko dan Kepatuhan Regulasi

Lulu Luciana Putri^{1*}, Joni Safaat Adiansyah¹, Sukuryadi¹, Ibrahim Ali¹

¹ Program Studi Magister Ilmu Lingkungan, Universitas Muhammadiyah Mataram.

DOI: <https://doi.org/10.29303/goescienceed.v7i4.2940>

Article Info:

Received : 18 Agustus 2026
Revised : 08 September 2026
Accepted : 26 September 2026
Published : 07 Oktober 2026

Correspondence:

Ilham M. Akbar

Phone:

Abstract: Hazardous and toxic waste (B3 waste) storage facilities in many industrial operations are often organized as a decentralized network of storage points spread across different operational areas. Such configurations frequently complicate inspection, monitoring, and regulatory oversight. This study aims to develop a generalizable evaluation model for hazardous waste storage systems that integrates risk assessment, operational performance indicators, transportation-related greenhouse gas (GHG) estimation, and regulatory compliance assessment within a single analytical framework. The model was developed through a conceptual-analytical approach that synthesizes a semi-quantitative likelihood-consequence risk matrix, a compliance matrix referring to national hazardous-waste regulations, an activity-based GHG estimation method, and a Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) scheme equipped with a regulatory compliance gate. An illustrative application of the model indicates that dispersed storage systems tend to fall into medium-to-high risk categories and show inconsistent compliance performance, whereas consolidating storage into fewer, centralized points is associated with lower risk categories, more uniform compliance, and reduced transportation-related emissions. The proposed model offers a structured, cross-sector tool for evaluating and redesigning hazardous waste storage systems to strengthen environmental performance and regulatory compliance.

Keywords: Hazardous Waste Storage; Risk Assessment; Regulatory Compliance; Evaluation Model; Environmental Performance.

Citation: Putri, L. L., Adiansyah, J. S., Sukuryadi, & Ali, I. (2026). Pengembangan Model Evaluasi Sistem Penyimpanan Limbah B3 Berbasis Risiko dan Kepatuhan Regulasi. *Jurnal Pendidikan, Sains, Geologi, Dan Geofisika (GeoScienceEd Journal)*, 7(4), 6085–6092. <https://doi.org/10.29303/goescienceed.v7i4.2940>

Pendahuluan

Pengelolaan Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun (Limbah B3) merupakan salah satu elemen fundamental dalam sistem manajemen lingkungan pada berbagai sektor industri modern. Limbah B3 memiliki karakteristik mudah terbakar, korosif, reaktif, dan/atau beracun sehingga berpotensi menimbulkan dampak akut maupun kronis terhadap lingkungan apabila tidak dikelola secara memadai (Nurlina, 2021). Oleh karena itu, setiap pelaku usaha di Indonesia diwajibkan memiliki sistem penyimpanan, pengemasan, dan pencatatan Limbah B3 yang memenuhi ketentuan Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021

(Pemerintah Republik Indonesia, 2021) serta Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor 6 Tahun 2021 (Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia, 2021).

Dalam praktiknya, banyak organisasi industri khususnya yang memiliki area operasional luas seperti sektor pertambangan, manufaktur, dan energi mengoperasikan lebih dari satu fasilitas penyimpanan Limbah B3 yang tersebar mendekati titik sumber timbunan. Fasilitas tersebut umumnya berupa Tempat Penyimpanan Sementara (TPS) utama yang berizin, serta sejumlah fasilitas pengumpulan operasional yang lazim disebut shelter atau temporary holding point.

Regulasi yang berlaku tidak secara eksplisit mendefinisikan nomenklatur “shelter”, sehingga penetapan kewajiban pengelolaan Limbah B3 tidak ditentukan berdasarkan nama fasilitas, melainkan berdasarkan fungsi aktual, durasi penyimpanan, karakteristik limbah yang dikelola, serta potensi risiko yang ditimbulkan (Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia, 2021). Konsekuensinya, setiap fasilitas apa pun namanya tetap harus dievaluasi terhadap pemenuhan persyaratan teknis penyimpanan Limbah B3 yang berlaku.

Struktur penyimpanan yang tersebar pada banyak titik cenderung meningkatkan kompleksitas pengawasan, beban inspeksi, dan risiko ketidakkonsistenan pencatatan, terutama ketika sumber daya pengawasan terbatas (Hartati & Elvira, 2024; Hendrajaya, 2023). Pola timbulan Limbah B3 pada sistem yang tersebar juga umumnya tidak merata; sebagian kecil fasilitas menghasilkan proporsi timbulan yang dominan, sedangkan sebagian besar fasilitas lainnya menghasilkan timbulan yang relatif rendah dan tidak kontinu suatu pola yang secara umum dikenal sebagai distribusi Pareto (80/20). Kondisi ini mendorong berkembangnya pendekatan konsolidasi atau sentralisasi fasilitas penyimpanan sebagai strategi peningkatan efektivitas pengawasan dan efisiensi operasional (Imamuddin, 2021).

Berbagai kajian terdahulu telah membahas evaluasi kepatuhan dan perencanaan teknis Tempat Penyimpanan Sementara Limbah B3 (Hartati & Elvira, 2024; Jawwad, 2023; Sede & Wikaningrum, 2026), maupun estimasi emisi Gas Rumah Kaca (GHG) dari aktivitas transportasi (Novi, 2020; IPCC, 2006). Namun demikian, kajian-kajian tersebut umumnya membahas aspek risiko, kepatuhan regulasi, kinerja operasional, dan emisi transportasi secara terpisah, sehingga belum tersedia kerangka evaluasi yang mengintegrasikan keempat aspek tersebut secara komprehensif dalam menilai kelayakan konfigurasi sistem penyimpanan Limbah B3. Padahal, keputusan mempertahankan atau mengonsolidasikan fasilitas penyimpanan pada dasarnya merupakan keputusan multi-kriteria yang melibatkan *trade-off* antara risiko lingkungan, beban kepatuhan, efisiensi operasional, dan dampak transportasi.

Berdasarkan kesenjangan tersebut, artikel ini bertujuan mengembangkan model evaluasi sistem penyimpanan Limbah B3 yang mengintegrasikan penilaian risiko (*risk assessment*), evaluasi kepatuhan regulasi (*regulatory compliance assessment*), evaluasi kinerja operasional, dan estimasi emisi Gas Rumah Kaca dari transportasi internal ke dalam satu kerangka analisis berbasis *Multi-Criteria Decision Analysis* (MCDA). Model ini dirancang agar bersifat generik dan dapat diterapkan pada berbagai jenis industri yang

mengelola Limbah B3 melalui banyak titik penyimpanan, tanpa bergantung pada konteks operasional satu perusahaan tertentu. Untuk mengilustrasikan penerapannya, model diuji secara deskriptif pada sistem penyimpanan Limbah B3 di sebuah industri sektor pertambangan mineral di Indonesia yang mengoperasikan banyak titik penyimpanan tersebar; seluruh data yang digunakan dalam ilustrasi tersebut telah digeneralisasi ke dalam bentuk kategori dan persentase relatif sehingga tidak merepresentasikan informasi teknis maupun operasional yang bersifat rahasia perusahaan.

Pengelolaan limbah berbahaya dan beracun (B3) saat ini tidak lagi hanya berfokus pada aspek penyimpanan dan kepatuhan regulasi, tetapi juga mempertimbangkan risiko operasional, dampak lingkungan, serta efektivitas pengambilan keputusan. Pengelolaan limbah B3 yang berkelanjutan memerlukan pendekatan terintegrasi yang mencakup pencegahan risiko, peningkatan efisiensi operasional, penerapan prinsip ekonomi sirkular, dan pengurangan dampak lingkungan sepanjang siklus pengelolaan limbah. Pendekatan tersebut dinilai penting mengingat meningkatnya volume limbah berbahaya akibat aktivitas industri dan kebutuhan untuk memastikan perlindungan lingkungan serta kesehatan masyarakat secara berkelanjutan.

Meskipun berbagai penelitian telah mengevaluasi kepatuhan TPS Limbah B3, perencanaan fasilitas penyimpan, dan estimasi emisi transportasi, belum ditemukan model evaluasi yang secara simultan mengintegrasikan penelitian risiko, kepatuhan regulasi, kinerja operasional, dan emisi gas rumah kaca ke dalam kerangka pengambilan keputusan berbasis MCDA. Oleh karena itu, penelitian ini mengembangkan model evaluasi terintegrasi yang dapat digunakan lintas sektor industri.

Metode

Pendekatan Pengembangan Model

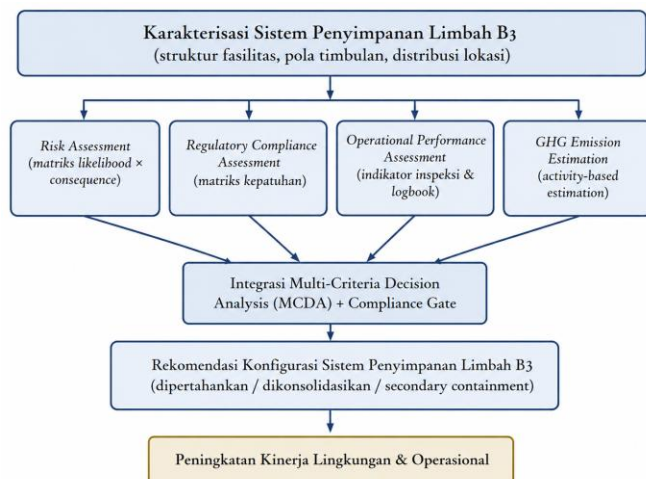
Model evaluasi dalam artikel ini dikembangkan melalui pendekatan konseptual-analitis (*conceptual-analytical approach*), yaitu penyusunan kerangka evaluasi berdasarkan sintesis teori penilaian risiko, ketentuan regulasi pengelolaan Limbah B3, konsep evaluasi kinerja operasional, metode estimasi emisi Gas Rumah Kaca (GHG) berbasis aktivitas, dan metode *Multi-Criteria Decision Analysis* (MCDA).

Metode *Multiple Criteria Decision Analysis* (MCDA) semakin banyak digunakan dalam pengambilan keputusan lingkungan karena mampu mengakomodasi berbagai kriteria yang saling berinteraksi dan sering kali memiliki kepentingan yang berbeda. Kajian terkini menunjukkan bahwa MCDA merupakan salah satu pendekatan yang paling luas

diterapkan dalam penyelesaian permasalahan lingkungan, termasuk pengelolaan limbah, penilaian keberlanjutan, dan evaluasi risiko lingkungan, karena mampu mengintegrasikan data kuantitatif maupun pertimbangan ahli ke dalam proses pengambilan keputusan yang sistematis

Pendekatan ini dipilih karena tujuan penelitian adalah menghasilkan kerangka evaluasi yang bersifat generik dan dapat digunakan lintas sektor industri, bukan menguji hipotesis statistik pada satu populasi tertentu.

Pengembangan model dilakukan melalui lima tahapan utama, yaitu: (1) identifikasi komponen struktural sistem penyimpanan Limbah B3, (2) perumusan instrumen penilaian risiko semi-kuantitatif, (3) perumusan instrumen evaluasi kepatuhan regulasi, (4) perumusan metode estimasi emisi GHG dari transportasi internal, dan (5) integrasi seluruh komponen melalui skema MCDA yang dilengkapi mekanisme compliance gate.



Gambar 1. Kerangka konseptual model disajikan pada

Komponen Struktural Sistem Penyimpanan Limbah B3

Model ini mendefinisikan sistem penyimpanan Limbah B3 berdasarkan fungsi aktual fasilitas, bukan nomenklturnya. Tiga kategori fungsional yang diakomodasi meliputi: (a) Tempat Penyimpanan Sementara (TPS) sebagai fasilitas utama yang berizin; (b) shelter atau fasilitas pengumpulan operasional yang berlokasi dekat sumber timbulan; dan (c) temporary holding point sebagai titik pengumpulan berkapasitas terbatas yang berfungsi mengurangi frekuensi mobilisasi limbah menuju fasilitas yang lebih terpusat. Setiap fasilitas, tanpa memandang nomenklturnya, dievaluasi terhadap kesesuaian konstruksi, sistem pengendalian pencemaran, pengemasan, pelabelan, pencatatan, pengendalian waktu simpan, program

inspeksi, dan kesiapan tanggap darurat. Variabel struktural yang dianalisis dalam model mencakup jumlah titik penyimpanan, pola distribusi lokasi, serta karakteristik timbulan pada masing-masing fasilitas, yang dikategorikan secara kualitatif ke dalam tingkat tinggi, sedang, dan rendah, serta sifat kontinu atau tidak kontinu. Kategorisasi ini digunakan untuk menghindari ketergantungan model terhadap data kuantitatif spesifik perusahaan, sekaligus memungkinkan perbandingan antarfasilitas maupun antarsektor industri.

Penerapan MCDA dalam model yang dikembangkan memungkinkan integrasi aspek risiko, kepatuhan regulasi, kinerja operasional, dan emisi gas rumah kaca ke dalam satu kerangka evaluasi yang komprehensif. Pendekatan ini memberikan keunggulan dibandingkan metode evaluasi konvensional karena mampu mempertimbangkan berbagai indikator secara simultan sehingga menghasilkan rekomendasi yang lebih objektif dan transparan. Selain itu, MCDA memungkinkan identifikasi alternatif terbaik berdasarkan kombinasi kinerja seluruh indikator yang digunakan dalam penelitian

Penilaian Risiko (Risk Assessment)

Penilaian risiko dilakukan menggunakan pendekatan semi-kuantitatif berbasis matriks risiko, yaitu perkalian antara nilai likelihood (kemungkinan kejadian) dan consequence (tingkat dampak). Kriteria likelihood dan consequence yang digunakan dalam model disajikan pada **Tabel 1** dan **Tabel 2**.

Tabel 1. Kriteria Likelihood

Skor	Kategori	Kriteria
1	Sangat Jarang	Tidak pernah terjadi dalam periode pengamatan
2	Jarang	Terjadi ≤ 1 kali per tahun
3	Kadang-kadang	Terjadi 2–3 kali per tahun
4	Sering	Terjadi 4–6 kali per tahun
5	Sangat Sering	Terjadi > 6 kali per tahun

Skor risiko diperoleh dari perkalian nilai likelihood dan consequence (skala 1–5), dengan kategori risiko diklasifikasikan sebagai berikut: skor 1–4 dikategorikan Rendah (Low), skor 5–11 dikategorikan Sedang (Medium), dan skor ≥ 12 dikategorikan Tinggi (High). Untuk mengurangi subjektivitas penilaian, model ini merekomendasikan penetapan skor melalui konsensus antarpemilai (inter-rater agreement) serta analisis sensitivitas terhadap perubahan satu tingkat skor likelihood maupun consequence. Model juga secara eksplisit mengakui empat keterbatasan metode matriks

risiko yang perlu dipertimbangkan dalam interpretasi hasil, yaitu subjectivity bias, range compression, ambiguitas batas kategori, dan risk reversal.

Tabel 2. Kriteria Consequence

Skor	Kategori	Kriteria Dampak
1	Tidak Signifikan	Tidak menimbulkan dampak lingkungan yang teramat
2	Minor	Dampak bersifat lokal dan dapat dikendalikan segera
3	Sedang	Memerlukan tindakan korektif tambahan
4	Mayor	Berpotensi mencemari lingkungan dan mengganggu operasional
5	Sangat Mayor / Katastropik	Berpotensi menimbulkan pencemaran serius dan ketidakpatuhan regulasi

Evaluasi Kepatuhan Regulasi (*Regulatory Compliance Assessment*)

Evaluasi kepatuhan dilakukan menggunakan matriks kepatuhan (*compliance matrix*) yang membandingkan kondisi fasilitas penyimpanan terhadap indikator teknis dan administratif yang relevan, meliputi status dokumen dan persetujuan, rantai kedap air, secondary containment, atap pelindung, ventilasi, segregasi limbah kompatibel, kondisi kemasan, label dan simbol, logbook dan pencatatan, pengendalian waktu simpan, program inspeksi, sarana tanggap darurat, dan pelaporan. Tingkat kepatuhan dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$\text{Tingkat Kepatuhan (\%)} = (\text{Jumlah indikator sesuai} \div \text{Jumlah indikator yang berlaku}) \times 100\% \dots (1)$$

Tabel 3. Kategori Tingkat Kepatuhan Regulasi

Rentang Skor	Kategori
$\geq 90\%$	Sangat Patuh
80% – 89%	Patuh
60% – 79%	Cukup Patuh
$< 60\%$	Tidak Patuh

Kategori kepatuhan ditetapkan sebagai berikut: $\geq 90\%$ dikategorikan Sangat Patuh; 80–89% dikategorikan Patuh; 60–79% dikategorikan Cukup

Patuh; dan $< 60\%$ dikategorikan Tidak Patuh (Tabel 3). Indikator yang tidak relevan dengan fungsi suatu fasilitas dikeluarkan dari perhitungan skor kepatuhannya.

Estimasi Emisi Gas Rumah Kaca (GHG) dari Transportasi Internal

Estimasi emisi GHG dari aktivitas transportasi internal Limbah B3 dilakukan menggunakan pendekatan activity-based estimation, yaitu mempertimbangkan frekuensi mobilisasi, jarak tempuh, dan faktor emisi kendaraan, dengan persamaan sebagai berikut:

$$\text{Emisi CO}_2\text{e} = \text{Aktivitas Transportasi} \times \text{Faktor Emisi} \dots (2)$$

Penambahan indikator emisi gas rumah kaca dalam model evaluasi memberikan perspektif keberlanjutan yang lebih luas terhadap sistem penyimpanan limbah B3. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa aktivitas pengelolaan limbah dapat menghasilkan emisi CO₂, CH₄, dan N₂O yang berkontribusi terhadap perubahan iklim sehingga perlu dipertimbangkan dalam proses pengambilan keputusan. Oleh karena itu, integrasi indikator emisi ke dalam model evaluasi memungkinkan pemilihan alternatif yang tidak hanya unggul secara teknis dan regulatif, tetapi juga memiliki dampak lingkungan yang lebih rendah

Pendekatan ini digunakan pada kondisi keterbatasan data konsumsi bahan bakar aktual, dengan faktor emisi merujuk pada sumber yang diakui secara internasional, seperti IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (IPCC, 2006), UK DEFRA Greenhouse Gas Reporting Conversion Factors, atau US EPA Emission Factors. Untuk keperluan perbandingan antarskenario, fasilitas penyimpanan dikelompokkan ke dalam tiga kategori jarak relatif terhadap fasilitas penyimpanan utama, yaitu kelompok jarak dekat, menengah, dan jauh, tanpa memerlukan data koordinat maupun jarak aktual yang bersifat rahasia perusahaan.

Integrasi Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA)

Keempat komponen evaluasi risiko, kepatuhan regulasi, kinerja operasional, dan emisi GHG diintegrasikan menggunakan pendekatan Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) untuk membandingkan konfigurasi sistem penyimpanan yang berbeda (misalnya sistem tersebar dibandingkan sistem terpusat). Kriteria evaluasi beserta bobot indikatif yang direkomendasikan model disajikan pada **Tabel 4**.

Tabel 4. Kriteria dan Bobot *Multi-Criteria Decision Analysis* (MCDA)

Kriteria Evaluasi	Bobot
Risiko lingkungan dan operasional	30%
Kepatuhan regulasi	25%
Kinerja operasional	20%
Biaya pengelolaan	15%
Emisi Gas Rumah Kaca (GHG)	10%

Model ini menerapkan mekanisme compliance gate, yaitu ketentuan bahwa konfigurasi sistem penyimpanan yang tidak memenuhi persyaratan regulasi minimum tidak dapat dipilih sebagai alternatif terbaik, sekalipun memiliki skor biaya atau efisiensi operasional yang lebih tinggi. Analisis sensitivitas terhadap perubahan bobot kriteria direkomendasikan untuk menilai kestabilan hasil pemeringkatan skenario.

Ilustrasi Penerapan Model

Untuk menunjukkan penerapan model, dilakukan uji coba deskriptif pada sistem penyimpanan Limbah B3 di sebuah industri sektor pertambangan mineral di Indonesia yang mengoperasikan satu fasilitas penyimpanan utama berizin serta sejumlah fasilitas penyimpanan operasional yang tersebar pada berbagai area kerja. Data yang digunakan berasal dari observasi lapangan, wawancara semi-terstruktur, telaah logbook timbulan, dan hasil inspeksi internal, yang seluruhnya telah digeneralisasi menjadi kategori kualitatif (tinggi/sedang/rendah, kontinu/tidak kontinu) dan nilai persentase relatif. Data kuantitatif spesifik seperti nama fasilitas, lokasi, jumlah titik penyimpanan aktual, volume timbulan dalam satuan ton, dan estimasi biaya investasi tidak disertakan dalam artikel ini karena bersifat rahasia operasional perusahaan dan tidak diperlukan untuk mengilustrasikan cara kerja model.

Hasil dan Diskusi

Karakteristik Umum Sistem Penyimpanan Limbah B3 yang Tersebar

Penerapan model pada sistem penyimpanan Limbah B3 yang tersebar menunjukkan pola struktural yang umum dijumpai pada industri dengan area operasional luas: satu fasilitas penyimpanan utama berizin didukung oleh banyak fasilitas penyimpanan operasional yang berlokasi dekat sumber timbulan. Semakin banyak titik penyimpanan yang harus diawasi, semakin tinggi pula beban inspeksi, pencatatan logbook, dan koordinasi pengangkutan yang harus ditangani oleh tim lingkungan dengan sumber daya manusia yang terbatas. Temuan ini konsisten dengan kajian terdahulu yang menunjukkan bahwa struktur penyimpanan yang tersebar cenderung meningkatkan kompleksitas pengawasan dan potensi ketidaksesuaian terhadap standar teknis penyimpanan (Hartati & Elvira, 2024; Hendrajaya, 2023).

Pola Distribusi Timbulan Limbah B3

Hasil karakterisasi timbulan menunjukkan bahwa distribusi Limbah B3 antarfasilitas penyimpanan pada sistem yang tersebar cenderung mengikuti pola Pareto (80/20), yaitu sebagian kecil fasilitas umumnya area produksi atau pemeliharaan peralatan dengan aktivitas kontinu menyumbang proporsi timbulan yang dominan, sedangkan sebagian besar fasilitas lainnya menghasilkan timbulan yang relatif kecil dan tidak kontinu. Pola ini mengindikasikan bahwa keberadaan fasilitas penyimpanan permanen pada setiap titik penghasil limbah berpotensi bersifat *over-structure*, yaitu jumlah fasilitas yang tersedia tidak sebanding dengan volume dan kontinuitas timbulan yang dilayani.

Hasil Penerapan Risk Assessment

Penerapan model penilaian risiko pada konfigurasi tersebar menunjukkan bahwa fasilitas dengan timbulan tinggi dan aktivitas kontinu umumnya menghadapi risiko pada kategori Sedang hingga Tinggi, terutama terkait potensi tumpahan, kelebihan kapasitas (*overcapacity*), dan kesalahan pencatatan logbook, sedangkan fasilitas dengan koordinasi pengangkutan yang kompleks menunjukkan risiko terkait keterlambatan pengangkutan. Ilustrasi hasil penilaian risiko generik disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Ilustrasi Risk Register pada Konfigurasi Penyimpanan Tersebar.

Tipe Fasilitas	Bahaya	Dampak Potensial	L	C	Skor	Kategori
Fasilitas produksi utama (timbulan tinggi, kontinu)	Tumpahan limbah cair	Pencemaran tanah	3	4	12	Sedang
Fasilitas produksi utama (timbulan tinggi, kontinu)	Kelebihan kapasitas	Penumpukan limbah	4	4	16	Tinggi

Tipe Fasilitas	Bahaya	Dampak Potensial	L	C	Skor	Kategori
Fasilitas pendukung perawatan alat (timbulan sedang)	Kebocoran kemasan	Kontaminasi lingkungan	3	3	9	Sedang
Fasilitas pengumpulan mitra kerja (timbulan rendah, tidak kontinu)	Keterlambatan pengangkutan	Melebihi batas waktu simpan	3	4	12	Sedang

Hasil penilaian menunjukkan bahwa pendekatan berbasis risiko mampu mengidentifikasi aktivitas penyimpanan limbah B3 yang memiliki potensi dampak terbesar terhadap keselamatan kerja dan lingkungan. Temuan ini sejalan dengan konsep pengelolaan limbah berbahaya berkelanjutan yang menempatkan identifikasi bahaya dan pengendalian risiko sebagai elemen utama dalam upaya meminimalkan dampak lingkungan. Oleh karena itu, penerapan evaluasi berbasis risiko dapat digunakan sebagai dasar dalam menentukan prioritas tindakan perbaikan pada sistem

penyimpanan limbah B3. Ketika konfigurasi disimulasikan menjadi sistem yang lebih terpusat dengan jumlah titik penyimpanan yang lebih sedikit namun berkapasitas dan berstandar lebih tinggi skor risiko pada seluruh kategori bahaya menunjukkan penurunan, dan kategori risiko keseluruhan bergeser dari Sedang-Tinggi menjadi Rendah-Sedang. Penurunan ini terutama didorong oleh peningkatan standar konstruksi fasilitas, penguatan pengawasan pada titik yang lebih sedikit, dan penjadwalan pengangkutan yang lebih terkendali (Tabel 6).

Tabel 6. Ilustrasi Perubahan Skor Risiko Setelah Konsolidasi Fasilitas Penyimpanan

Bahaya	Skor Awal	Skor Setelah Konsolidasi	Keterangan Perubahan
Tumpahan limbah cair	12	8	Jumlah titik lebih sedikit dan pengawasan meningkat
Kelebihan kapasitas	16	9	Kapasitas fasilitas terpusat lebih memadai
Kesalahan pencatatan logbook	8	4	Titik pencatatan berkurang dan lebih terstandardisasi
Keterlambatan pengangkutan	12	6	Jadwal mobilisasi lebih terkendali

Hasil Evaluasi Kepatuhan Regulasi

Evaluasi kepatuhan pada konfigurasi tersebar menunjukkan bahwa sebagian besar fasilitas telah memenuhi mayoritas indikator kepatuhan; namun demikian, ketidaksesuaian yang bersifat parsial masih ditemukan terutama pada indikator *secondary containment*, segregasi limbah kompatibel, dan konsistensi pencatatan logbook, khususnya pada fasilitas dengan volume timbulan tinggi dan aktivitas penyimpanan yang kompleks. Sebaliknya, fasilitas dengan aktivitas yang lebih homogen cenderung menunjukkan tingkat kepatuhan yang lebih konsisten. Pola ini menunjukkan bahwa tingkat kepatuhan tidak semata-mata ditentukan oleh ketiadaan prosedur, melainkan oleh kompleksitas implementasi akibat banyaknya titik penyimpanan yang harus distandardisasi secara seragam.

Pada konfigurasi terpusat, model menunjukkan bahwa kendali kepatuhan menjadi lebih mudah dilaksanakan karena standar fasilitas dapat diterapkan

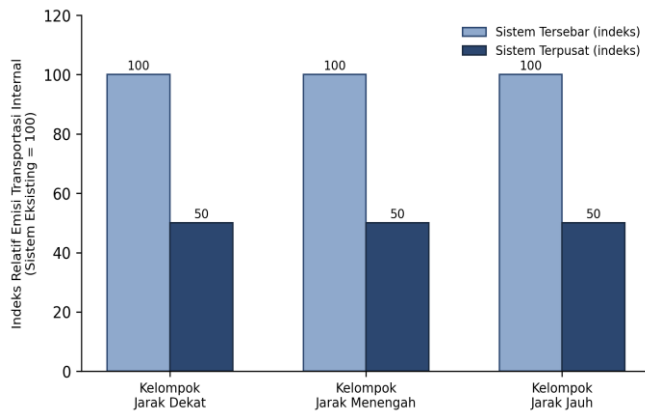
secara seragam pada jumlah titik yang lebih sedikit, sehingga berpotensi meningkatkan proporsi fasilitas pada kategori Sangat Patuh dan Patuh.

Aspek kepatuhan regulasi memiliki peran penting dalam menentukan efektivitas sistem penyimpanan limbah B3. Integrasi penilaian kepatuhan dengan penilaian risiko pada penelitian ini memungkinkan identifikasi ketidaksesuaian yang berpotensi meningkatkan risiko lingkungan maupun risiko operasional. Dengan demikian, peningkatan tingkat kepatuhan tidak hanya memenuhi persyaratan hukum yang berlaku, tetapi juga berfungsi sebagai langkah pengendalian risiko yang efektif dalam pengelolaan limbah B3.

Estimasi Emisi GHG dari Transportasi Internal

Estimasi emisi GHG menggunakan pendekatan activity-based menunjukkan bahwa pengurangan jumlah titik penyimpanan melalui konsolidasi berpotensi menurunkan frekuensi mobilisasi Limbah B3

secara signifikan, sehingga menurunkan aktivitas transportasi internal dan estimasi emisi GHG yang dihasilkan. Berdasarkan simulasi pada tiga kelompok jarak (dekat, menengah, dan jauh), pola yang konsisten ditemukan pada seluruh kelompok, yaitu penurunan indeks emisi transportasi internal pada kisaran sekitar 50% dibandingkan konfigurasi tersebar, sebagaimana diilustrasikan pada **Gambar 2**.



Gambar 2. Ilustrasi Pola Relatif Penurunan Emisi Transportasi Internal pada Skenario Konsolidasi (indeks, sistem tersebar = 100)

Hasil ini bersifat indikatif dan digunakan untuk membandingkan kinerja lingkungan antarkonfigurasi, bukan sebagai inventarisasi emisi aktual berbasis konsumsi bahan bakar kendaraan. Meskipun demikian, pola penurunan yang konsisten pada seluruh kelompok jarak menunjukkan bahwa konsolidasi fasilitas penyimpanan secara struktural berpotensi memberikan manfaat lingkungan melalui pengurangan intensitas transportasi internal, sejalan dengan prinsip bahwa hubungan antara aktivitas transportasi dan emisi GHG bersifat linier terhadap frekuensi dan jarak mobilisasi.

Integrasi MCDA dan Kelayakan Konfigurasi Penyimpanan

Hasil integrasi keempat komponen evaluasi melalui skema MCDA menunjukkan bahwa konfigurasi penyimpanan yang lebih terpusat secara konsisten memperoleh skor tertimbang yang lebih tinggi dibandingkan konfigurasi tersebar, terutama pada kriteria risiko lingkungan dan operasional (bobot 30%) serta kepatuhan regulasi (bobot 25%), yang bersama-sama mendominasi total bobot penilaian.

Mekanisme compliance gate memastikan bahwa konfigurasi mana pun yang tidak memenuhi persyaratan regulasi minimum tereliminasi dari alternatif terbaik, terlepas dari keunggulannya pada kriteria biaya atau efisiensi operasional. Analisis sensitivitas terhadap perubahan bobot kriteria menunjukkan bahwa preferensi terhadap konfigurasi

terpusat relatif stabil selama bobot risiko dan kepatuhan regulasi tetap menjadi kriteria dominan, yang mencerminkan karakteristik pengelolaan Limbah B3 sebagai kegiatan yang mengutamakan pengendalian risiko dan kepatuhan hukum di atas efisiensi biaya semata.

Implikasi Model bagi Berbagai Sektor Industri

Model evaluasi yang dikembangkan dalam artikel ini bersifat generik karena tidak bergantung pada nomenklatur fasilitas, jumlah titik penyimpanan, maupun data kuantitatif spesifik suatu perusahaan. Struktur model karakterisasi sistem, penilaian risiko, evaluasi kepatuhan, estimasi emisi transportasi, dan integrasi MCDA dapat diadaptasi pada berbagai sektor industri yang mengelola Limbah B3 melalui banyak titik penyimpanan, seperti manufaktur, fasilitas kesehatan, kawasan industri kimia, maupun sektor energi. Adaptasi model pada sektor lain hanya memerlukan penyesuaian pada kategori bahaya, indikator kepatuhan spesifik, dan faktor emisi kendaraan yang relevan dengan jenis limbah dan pola operasional masing-masing sektor.

Dengan demikian, model ini berkontribusi mengisi kesenjangan pada literatur pengelolaan Limbah B3 yang sebelumnya cenderung mengevaluasi risiko, kepatuhan, dan aspek lingkungan secara terpisah (Hartati & Elvira, 2024; Jawwad, 2023; Sede & Wikaningrum, 2026), dengan menawarkan kerangka evaluasi terintegrasi yang dapat mendukung pengambilan keputusan berbasis data dalam merancang atau mengevaluasi ulang konfigurasi sistem penyimpanan Limbah B3.

Kesimpulan

Artikel ini mengembangkan model evaluasi sistem penyimpanan Limbah B3 yang mengintegrasikan penilaian risiko semi-kuantitatif, evaluasi kepatuhan regulasi, evaluasi kinerja operasional, dan estimasi emisi Gas Rumah Kaca dari transportasi internal ke dalam satu kerangka analisis berbasis *Multi-Criteria Decision Analysis* (MCDA) yang dilengkapi mekanisme *compliance gate*. Model ini dirancang agar generik dan tidak bergantung pada nomenklatur fasilitas maupun data kuantitatif spesifik suatu perusahaan, sehingga dapat diterapkan pada berbagai sektor industri yang mengelola Limbah B3 melalui banyak titik penyimpanan.

Ilustrasi penerapan model menunjukkan pola umum bahwa sistem penyimpanan yang tersebar pada banyak titik cenderung berada pada kategori risiko Sedang hingga Tinggi dan menunjukkan kepatuhan regulasi yang kurang konsisten, sedangkan konsolidasi menuju konfigurasi yang lebih terpusat berpotensi menurunkan kategori risiko, meningkatkan konsistensi

kepatuhan, dan mengurangi emisi GHG dari aktivitas transportasi internal. Hasil integrasi MCDA menunjukkan bahwa konfigurasi terpusat secara konsisten memperoleh skor tertimbang yang lebih tinggi, khususnya pada kriteria risiko dan kepatuhan regulasi yang mendominasi bobot penilaian.

Model ini memberikan kontribusi metodologis berupa kerangka evaluasi yang mengintegrasikan empat dimensi risiko, kepatuhan, kinerja operasional, dan emisi transportasi yang sebelumnya umumnya dikaji secara terpisah dalam literatur pengelolaan Limbah B3. Meskipun demikian, model ini memiliki keterbatasan, antara lain subjektivitas inheren pada metode matriks risiko dan sifat estimatif dari pendekatan activity-based untuk emisi GHG. Penelitian selanjutnya disarankan untuk memvalidasi model ini pada berbagai sektor industri lain, mengembangkan inventarisasi emisi GHG berbasis data konsumsi bahan bakar aktual, mengintegrasikan analisis biaya-manfaat secara kuantitatif, serta menerapkan analisis workload berbasis pengukuran waktu kerja aktual untuk memperkuat dimensi kinerja operasional dalam model.

Ucapan Terimakasih

Penulis menyampaikan terima kasih kepada dosen pembimbing serta pihak Program Studi Magister Ilmu Lingkungan, Pascasarjana Universitas Muhammadiyah Mataram atas bimbingan dan dukungan yang diberikan selama proses penelitian dan penulisan artikel ini.

Referensi

- Hartati, E., & Elvira, V. (2024). Perencanaan tempat penyimpanan sementara limbah bahan berbahaya dan beracun (B3). *Jurnal Tekno Insentif*, 18(1), 1–10. <https://doi.org/10.36787/jti.v18i1.1400>
- Hendrajaya, G. L. (2023). Evaluasi pengelolaan limbah bahan berbahaya dan beracun (LB3) di tempat penyimpanan sementara LB3 (TPS LB3) di PT Z Regional Office 3 (RO3). *Rekayasa Hijau: Jurnal Teknologi Ramah Lingkungan*, 7(2), 152–165. <https://doi.org/10.26760/jrh.v7i2.152-165>
- Imamuddin, A. (2021). An integrated information system design for managing national hazardous waste in Indonesia: A proposal. *Indonesian Journal of Education, Social Sciences and Research*, 2(2), 102–108.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2006). 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. IPCC.
- Jawwad, M. A. S. (2023). Evaluasi tempat penyimpanan sementara (TPS) limbah B3 di ORF Porong PT. Pertamina Gas Oeja. *Jurnal Pengendalian Pencemaran Lingkungan (JPPL)*, 5(2), 178–188. <https://doi.org/10.35970/jppl.v5i2.1995>
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia. (2021). Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor 6 Tahun 2021 tentang tata cara dan persyaratan pengelolaan limbah bahan berbahaya dan beracun. Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan.
- Novi, Y. (2020). Kajian emisi gas rumah kaca (CO₂, CH₄, dan N₂O) dari sektor transportasi di Terminal Giwangan D.I. Yogyakarta [Skripsi Sarjana, Universitas Islam Indonesia]. Repositori Universitas Islam Indonesia. <https://dspace.uui.ac.id/handle/123456789/29421>
- Nurlina. (2021). Toxic and hazardous waste (B3) management at PT PAL Indonesia (Persero). *Indian Journal of Public Health Research and Development*, 16(1), 449–460. <https://doi.org/10.20473/ijph.v16i1.2021.449-460>
- Pemerintah Republik Indonesia. (2021). Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021 tentang penyelenggaraan perlindungan dan pengelolaan lingkungan hidup. Sekretariat Negara.
- Sede, J. S. U., & Wikaningrum, T. (2026). Redesigning a hazardous waste storage facility to improve compliance and safety in a plastic packaging company in Bekasi Regency. *Jurnal Serambi Engineering*, 11(2). <https://jse.serambimekkah.id/index.php/jse/article/view/1745>
- Digkoglou, P., Tsoukiàs, A., Papathanasiou, J., & Gotzamani, K. (2024). A meta-analysis of the review literature on multiple-criteria decision aids for environmental issues. *Applied Sciences*, 14(23), 10862. <https://doi.org/10.3390/app142310862>
- Kumar, A., Thakur, A. K., Gaurav, G. K., Klemeš, J. J., Sandhwar, V. K., Pant, K. K., & Kumar, R. (2023). A critical review on sustainable hazardous waste management strategies: A step towards a circular economy. *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 103021–103051. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-29511-8>
- Yang, G., Liu, M., Gao, Y., Han, S., Meng, F., Ju, T., & Jiang, J. (2024). A review on the evaluation models and impact factors of greenhouse gas emissions from municipal solid waste management processes. *Environmental Science and Pollution Research*. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-33042-1>