

Terbit online pada laman web jurnal :<http://jurnaldampak.ft.unand.ac.id/>

Dampak: Jurnal Teknik Lingkungan Universitas Andalas

| ISSN (Print) 1829-6084 |ISSN (Online) 2597-5129|



Artikel Penelitian

Studi Kasus Pengolahan Air PLTU Y 1×660 MW dengan LCA

Ilham Satria Raditya Putra ^{*)}, Arie Dipareza Syafei

Departemen Teknik Lingkungan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia

*Koresponden: ilham.satria@outlook.co.id

Diterima: 30 Mei 2025

Diperbaiki: 21 Juni 2025

Disetujui: 7 Juli 2025

ABSTRACT

Water treatment plays a vital role in supporting coal fired power plant operations. This process influences the quality of demineralization water used as boiler feed water and cooling media. Furthermore, the post-treatment process before discharge into water bodies also determines the extent of environmental impact. This study presents a Life Cycle Assessment (LCA) of a coal-fired power plant's water treatment. The study aims to evaluate the environmental impacts of the water treatment process, including chemical usage and waste management as a by-product from the treatment of water quality, and also determine the process point with the significant impact. These steps include defining the purpose and scope, inventorying and assessing life cycle impacts, and interpretation. Through an approach using the CML IA Baseline and ReCiPe 2016 Midpoint, the impact assessment focused on the effects that influence the sustainability of terrestrial and aquatic ecosystems such as marine aquatic ecotoxicity, human toxicity, and other impacts. The impact assessment indicates that the significant environmental impact is influenced by chemicals, especially the coagulant and hazardous waste such as used oil and used hazardous packaging. This influences the high environmental impacts such as marine aquatic ecotoxicity, terrestrial ecotoxicity, human carcinogenic toxicity, and global warming potential. The implementation strategy of environmental programs is carried out, such as the substitution of FeCl_3 to $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, reuse of used hazardous packaging, and processing used oil into vehicle oil. This study can provide an overview for similar industries in optimizing power plant water treatment processes towards sustainable operations.

Keyword: environmental program, life cycle assessment, risk management, water treatment

ABSTRAK

Pengolahan air memainkan peran vital dalam mendukung operasional pembangkit listrik tenaga uap. Proses ini secara tidak langsung mempengaruhi kualitas air demineralisasi yang digunakan sebagai air umpan boiler dan media pendinginan. Selain itu, proses pengolahannya sebelum dibuang ke badan air juga menentukan seberapa besar dampak yang akan tersebar ke lingkungan sekitar. Studi ini menyajikan Penilaian Siklus Hidup (LCA) dari pengolahan air PLTU. Studi ini bertujuan untuk mengevaluasi dampak lingkungan dari proses pengolahan air, termasuk penggunaan bahan kimia dan pengelolaan limbah sebagai produk samping dari pemeliharaan kualitas air, serta menentukan titik proses dengan dampak paling signifikan. Tahapan penyusunannya mencakup penentuan tujuan dan ruang lingkup, inventarisasi dan penilaian dampak siklus hidup, serta interpretasi. Melalui pendekatan metode CML IA Baseline dan ReCiPe 2016 Midpoint, penilaian dampak difokuskan pada dampak yang mempengaruhi ekosistem darat dan akuatik seperti *marine aquatic ecotoxicity*, *human toxicity*, dan dampak-dampak lainnya. Penilaian dampak yang dilakukan menunjukkan beban lingkungan yang signifikan dipengaruhi oleh koagulan dan limbah B3 seperti oli bekas dan kemasan bekas B3. Hal ini mempengaruhi tingginya dampak lingkungan seperti *marine aquatic ecotoxicity*, *terrestrial ecotoxicity*, *human carcinogenic toxicity*, dan *global warming potential*. Strategi penerapan program lingkungan dilakukan, seperti penggantian koagulan FeCl_3 menjadi $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, penggunaan kembali kemasan bekas B3, dan pengolahan oli bekas menjadi oli kendaraan. Studi ini dapat menjadi gambaran untuk industri sejenis dalam mengoptimalkan proses pengolahan air pembangkit listrik menuju operasional yang berkelanjutan.

Kata Kunci: *life cycle assessment*, manajemen risiko, program lingkungan, pengolahan air

1. PENDAHULUAN

Pembangkit listrik tenaga uap menjadi salah satu andalan utama dalam pemenuhan kebutuhan konsumsi listrik di Indonesia. Sumber bahan bakar yang terukur, dapat dipastikan setiap saat, serta tidak tergantung pada kondisi cuaca dan lokasi geografis menjadikannya sebagai sumber listrik yang andal dengan daya yang stabil (van der Wiel et al., 2019). Batu bara sebagai sumber bahan bakarnya digunakan di dalam *boiler* untuk memanaskan air hingga berubah menjadi uap bertekanan. Dengan beberapa tahapan pemanasan di dalam *boiler*, uap bertekanan tinggi ini akan digunakan untuk memutar turbin dan generator, mengonversi energi gerak menjadi energi listrik, yang kemudian akan disalurkan ke *switchyard*. Setelah itu, uap akan dikondensasi dalam sistem kondensat untuk kemudian dikembalikan lagi ke dalam *boiler*. Proses ini didasarkan pada siklus termodinamika *rankine*, yang berkonsep pada konversi panas menjadi energi mekanik dan energi listrik, dengan meminimalkan kehilangan energi agar luaran energi lebih optimal (Gao et al., 2018).

Proses tersebut ditopang dengan sistem pengolahan air baku yang berfungsi sebagai air umpan untuk produksi uap bertekanan tinggi dan juga berperan dalam sistem pendingin berupa kondenser. Air baku ini umumnya diambil dari sumber mata air yang melimpah dan tidak akan habis dalam waktu dekat, seperti air laut. Air laut yang mengandung berbagai macam polutan tidak dapat digunakan secara langsung dalam sistem pembangkitan listrik, sebelum melewati proses pengolahan secara bertahap untuk menghilangkan padatan terlarut, bahan organik, dan mikroorganisme. Tahapan pengolahan diawali dengan *pre-treatment* untuk menyisihkan padatan terlarut yang berukuran cukup besar, sebelum dilanjutkan ke tahapan filtrasi membran *Reverse Osmosis* (RO). Pengolahan air ini tidak lepas dari penambahan bahan kimia pada masing-masing tahapan yang berfungsi untuk meminimalisir kerusakan sistem akibat aliran air yang terhambat atau korosi, serta memperpanjang durasi pakai dari membran pada tahapan *reverse osmosis* (Yaqub et al., 2022).

Pemeliharaan kualitas air untuk memastikan keberlangsungan operasional, di sisi lain juga memunculkan risiko lingkungan yang cukup signifikan. Unit pengolahan yang sudah berumur cenderung mengalami penurunan performa pengolahan, sehingga kualitas pengolahan kurang optimal. Unsur yang terkandung dalam air limbah seperti logam berat (timbal, arsenik, kadmium, dan lainnya) dapat menyebabkan gangguan pada komponen sel organisme air yang berujung pada bioakumulasi, yang secara tidak langsung menimbulkan potensi mutasi sel dan meningkatkan toksisitasnya apabila berinteraksi dengan logam berat, mikroplastik, atau polutan organik lainnya (Jeong et al., 2023). Padatan tersuspensi yang lolos dari pengolahan dapat menyebabkan perubahan ekosistem akuatik, termasuk pada kemampuan fisiologis tanaman air yang terganggu (Rono, 2017). Tingginya bahan organik seperti amonia, nitrat, dan fosfat dapat menyebabkan munculnya eutrofikasi akibat pertumbuhan ganggang yang berlebihan, sehingga mengurangi kadar oksigen dalam air dan menimbulkan aroma yang kurang sedap (Yan et al., 2020). Minyak dan lemak menjadi salah satu polutan yang umum ditemui juga pada air limbah dan seringkali dianggap sebagai polutan yang sulit dihilangkan karena kemampuan terurai secara biologisnya rendah. Lapisan tipis dari minyak dapat menurunkan penetrasi cahaya matahari dan transfer oksigen antara udara dan air, sehingga menurunkan kualitas hidup organisme air (Pintor et al., 2016).

Selain itu, penggunaan bahan kimia yang kurang efektif atau berlebihan berpotensi meningkatkan timbulan limbah berbahaya untuk diolah lebih lanjut. Sehingga berpotensi membuka celah terjadinya kontaminasi lingkungan lanjutan akibat beban penyimpanan limbah B3 yang melebihi kapasitas. Produk samping seperti limbah terkontaminasi bahan B3, oli bekas, lumpur sisa sebagai produk sampling dari proses koagulasi-flokulasi, serta kemasan bahan kimia berlabel B3 merupakan jenis limbah B3 yang umum dihasilkan dan memerlukan pengolahan lebih lanjut. Limbah ini diketahui memiliki potensi pencemaran ekosistem air, tanah, dan udara yang mempengaruhi kesehatan makhluk hidup yang tinggal disekitarnya apabila tidak terkelola dengan baik. Secara tidak langsung, polutan dapat memberikan efek tunda terhadap manusia dan makhluk hidup lainnya yang hanya dapat dirasakan setelah periode tertentu, seperti kerusakan jaringan saraf, gangguan pada sistem pernapasan, sampai dengan mutasi pada sel. Pencemaran ini tidak hanya disebabkan oleh sumber pencemar utama, melainkan juga pencemar berupa emisi fugitif yang mengacu pada pelepasan emisi yang tidak terkontrol yang tersebar ke udara. Dalam konteks pengolahan air, terdapat beberapa hal seperti timbulnya gas metana dan dinitrogen oksida akibat dari sistem pengolahan air limbah atau pembentukan lumpur, maupun penyimpanan oli bekas di gudang limbah B3. Sebagai akibatnya, lonjakan emisi karbon akan terbentuk sebagai hasil dari emisi fugitif yang

menciptakan efek domino bagi lingkungan, yang memicu peningkatan beban pencemar tidak terduga (Exposto & Sujaya, 2021).

Pengelolaan bahan kimia dan limbah B3 dilakukan berdasarkan prosedur operasi standar, yang dikembangkan ke dalam bentuk sasaran lingkungan, yang ditetapkan dalam kebijakan lingkungan perusahaan. Standar pengelolaan ini berkilat pada ISO 14001:2015, memuat klausul bahwa industri harus mengidentifikasi dan mengevaluasi aspek dan dampak lingkungan melalui pendekatan yang sistematis dan berbasis data. Pendekatan ini dilakukan agar setiap aktivitas yang mendukung proses operasional industri dapat terpetakan dan berbagai potensi dampak lingkungan yang mungkin timbul dapat diidentifikasi. Penerapannya terbatas pada penetapan suatu proses yang dapat diamati dan terukur dengan rekaman data, sehingga agak sulit untuk menentukan apakah suatu proses dapat dicegah agar tidak menimbulkan dampak tanpa adanya kajian lingkungan. Metode pengawasan yang masih bersifat konvensional, seperti pengawasan langsung, audit kepatuhan, dan pemantauan kinerja pengelolaan lingkungan juga belum mampu menjangkau implikasi lingkungan yang lebih luas selagi menyoroti pengaruh dari proses-proses di sepanjang siklus hidupnya (Gormley-Gallagher et al., 2011).

Melihat keterbatasan ini, *Life Cycle Assessment* (LCA) muncul sebagai perangkat yang efektif untuk mengukur dampak lingkungan terkait operasi industri, termasuk pembangkit listrik. LCA menyediakan kerangka kerja untuk mengevaluasi beban lingkungan dari suatu proses, produk, atau layanan dari *cradle to grave* yang meliputi ekstraksi bahan baku, konsumsi energi, pengolahan dan distribusi bahan, produksi emisi, dan timbulan limbah pada setiap tahap (Mahmud et al., 2022). Pemodelan LCA memberikan gambaran tingkat efektivitas dari suatu proses operasional, guna mengidentifikasi titik proses yang memberikan dampak lingkungan paling signifikan (*hotspot*). Identifikasi *hotspot* ini menjadi panduan dalam pengambilan keputusan untuk memprioritaskan area yang memerlukan perbaikan atau pengembangan lingkungan untuk menentukan langkah mitigasi yang paling tepat yang berorientasi pada aspek lingkungan (Mardi et al., 2022). Afifah (2022) melakukan evaluasi LCA pada operasional PLTU 1x660 MW dengan sumber dampak emisi, air limbah, dan limbah B3 terhadap keseluruhan unit proses pada pembangkit listrik tanpa mengikutsertakan unit proses *Wastewater Treatment Plant* (WWTP). Berdasarkan studi tersebut, *hotspot* dari seluruh kegiatan produksi listrik adalah unit proses *boiler*, dengan kontributor terbesar pada proses pembakaran batu bara. Ambarita (2023) melakukan kajian terhadap instalasi WWTP pada PLTU PT PJB Muara Karang, dengan 3 kategori dampak terbesar yaitu *global warming potential*, *non-renewable energy*, dan *aquatic acidification*. Langkah mitigasi yang dilakukan terhadap potensi ketika dampak tersebut adalah dengan mengganti sumber energi tidak terbarukan dengan energi terbarukan seperti energi yang berasal dari surya atau air. Upaya-upaya mitigasi sejenis dilakukan untuk meminimalisir dampak lingkungan dari berbagai proses dalam kegiatan pembangkitan listrik.

Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi potensi dampak lingkungan yang muncul dari proses operasional pengolahan air pembangkit listrik tenaga uap berkapasitas 1x660 MW menggunakan LCA selama satu tahun, dengan data yang diambil tahun 2023. Penilaian dampak menggunakan perangkat lunak SimaPro versi 9.5 dengan basis data dari Ecoinvent V3 dan metode berdasarkan ReCiPe 2016 Midpoint (H) dan CML IA Baseline. Kategori dampak yang akan diidentifikasi seputar dampak yang berhubungan dengan air limbah yang dibuang ke badan air dan pengelolaan limbah B3 yang berinteraksi dengan daratan dan emisinya ke udara. Kategori dampak yang telah teridentifikasi akan mendukung pengambilan keputusan berbasis risiko lingkungan dan meningkatkan kepatuhan terhadap ISO 14001:2015 melalui pengembangan indikator kinerja lingkungan yang terukur.

2. METODOLOGI

Studi ini mengacu pada ISO 14040:2006 dan ISO 14044:2006 terkait dengan *Life Cycle Assessment* (LCA), dari pengolahan air pada pembangkit listrik tenaga uap superkritikal berkapasitas 1x660 MW yang menggunakan batu bara sebagai bahan bakar utamanya. Penilaian dibatasi dengan ruang lingkup *cradle to gate* dengan data yang dikumpulkan pada periode tahun 2023. Sesuai dengan ISO 14040:2006, tahapan yang dilakukan:

a. Tujuan dan Ruang Lingkup

Tujuan dari studi ini adalah untuk mengukur dan mengevaluasi dampak lingkungan yang terkait dengan pengolahan air, termasuk penggunaan bahan kimia, pembuangan air limbah sebagai produk samping dari

kegiatan pengolahan air, dan juga munculnya limbah B3 padat, serta menentukan titik proses dengan dampak paling signifikan. Ruang lingkup studi ini mencakup pengambilan air laut, pengolahannya, sampai dengan pembuangan air limbah ke badan air. Hal ini meliputi *Water Treatment Plant* (WTP), *Sea Water Reverse Osmosis* (SWRO), *Brackish Water Reverse Osmosis* (BWRO), *Mixed Bed Polisher* (MBP) sebagai air umpan boiler, dan *Wastewater Treatment Plant* (WWTP). Unit fungsi ditetapkan sebagai 1 m³ air yang digunakan untuk menopang operasional pembangkit listrik, dengan air laut sebagai sumber utama.

b. *Life Cycle Inventory* (LCI)

- Data operasional pengolahan air dikumpulkan dari *logbook* operasional
- Data bahan kimia, data limbah B3 meliputi *logbook* dan neraca limbah B3, serta data kualitas air limbah yang dijabarkan pada Tabel 1.

Tabel 1 Data Inventori Bahan Kimia, Limbah B3, dan Kualitas Air

Input Bahan Kimia	Output Limbah B3 dan Kualitas Air Limbah Teridentifikasi
<i>Water Treatment Plant</i> (WTP)	
- Polimer anionik: 382 kg	- TSS: 1.700,01 kg/tahun
- FeCl ₃ : 11.259,5 kg	
<i>Sea Water Reverse Osmosis</i> (SWRO)	
- Sodium Metabisulfat (SBS): 4.751 kg	- Limbah kemasan terkontaminasi B3: 2.180 kg
- Sodium Heksametafosfat (SHMP): 4.751 kg	- Limbah <i>filter cartridge</i> terkontaminasi B3: 1.961 kg
- Sodium Tripolifosfat (STPP): 1.125 kg	- Oli bekas: 9.360 kg
- Asam sitrat: 1.125 kg	- RO membran: 800 kg
- Na ₄ EDTA: 450 kg	
<i>Brackish Water Reverse Osmosis</i> (BWRO)	
- NaOH: 1.750 kg	
- Sodium Tripolifosfat (STPP): 625 kg	
- Asam sitrat: 500 kg	
- Na ₄ EDTA: 200 kg	
<i>Mixed Bed Polisher</i> (MBP)	
- NaOH: 6.181,95 kg	- <i>Glasswool</i> : 541 kg
- HCl: 4.771,82 kg	- Resin Penukar Anion: 28.695 kg
<i>Wastewater Treatment Plant</i> (WWTP)	
- NaOH: 5.609 kg	- TSS: 387,47 kg/tahun
- HCl: 7.270 kg	- Total Cr: 0,66 kg/tahun
	- Minyak dan Lemak: 203,80 kg/tahun
	- Cu: 1,6 kg/tahun
	- Fe: 9,74 kg/tahun
	- Zn: 1,58 kg/tahun
	- PO ₄ : 3,26 kg/tahun

Data-data tersebut dimasukkan ke dalam *software* SimaPro 9.5, sebuah perangkat lunak yang dikembangkan oleh PRé Sustainability yang mampu membangun model siklus hidup yang komprehensif, serta mendukung referensi metode penilaian dampak yang luas seperti CML, ReCiPe, IMPACT, TRACI, dan lainnya. Basis datanya menggunakan Ecoinvent V3 yang memiliki puluhan ribu dataset (18.000 dataset) yang mencakup bahan baku, energi, transportasi, sampai pengolahan limbah lintas sektor (Nickel, 2023).

c. *Life Cycle Impact Assessment* (LCIA)

Penilaian kategori dampak menggunakan metode CML IA Baseline dan ReCiPe 2016 Midpoint (H). Kategori dampak yang dinilai antara lain:

CML IA Baseline:

- *Global Warming Potential*,
- *Human toxicity*,
- *Terrestrial ecotoxicity*,
- *Acidification*, dan

- *Marine aquatic ecotoxicity*
 - *Eutrophication.*
- ReCiPe 2016 Midpoint (H):
- *Human carcinogenic toxicity,*
 - *Human non-carcinogenic toxicity,*
 - *Marine ecotoxicity,*
 - *Marine eutrophication,*
 - *Terrestrial acidification,*
 - *Terrestrial ecotoxicity,*
 - *Water consumption, dan*
 - *Global Warming Potential.*

Dampak lingkungan dari setiap kategori secara rumus dihitung menggunakan persamaan:

$$\text{Kategori dampak} = \sum_{i=1}^{12} (Q_i \times CF_i) \quad (1)$$

Keterangan:

Q_i = Nilai *input* atau emisi

CF_i = Faktor karakterisasi untuk setiap kategori dampak

d. Interpretasi data

Mengidentifikasi titik yang memberikan dampak lingkungan signifikan (*hotspot*) untuk dievaluasi dan dianalisis menggunakan berbagai skenario pengurangan dampak lingkungan. Selanjutnya, rekomendasi program lingkungan disusun sebagai dasar pengurangan dampak lingkungan. Rekomendasi tersebut didukung dengan penilaian aspek manajemen risiko sebagai bentuk penentuan skala prioritas pelaksanaan program lingkungan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Analisis Penilaian Dampak

Penilaian siklus hidup telah dilakukan pada data inventori pengolahan air pembangkit listrik tenaga uap berkapasitas 660 MW. Penilaian kategori dilakukan melalui tahapan karakterisasi dan normalisasi. Karakterisasi menggunakan model kategori dampak untuk mengukur besar dari masing-masing *elementary flow* yang ditetapkan. Nantinya pada tahapan ini, kontribusi dari produk atau aktivitas dari masing-masing kategori dampak akan diukur, dan secara langsung hasilnya dapat dibandingkan satu sama lain (Wibawa et al., 2020). Nilai karakterisasi yang diperoleh dari perhitungan SimaPro ditunjukkan pada Tabel 2 dan Tabel 3.

Tabel 2 Nilai Karakterisasi CML IA Baseline

Kategori Dampak	Unit (kg)	WTP	SWRO	BWRO	MBP	WWTP	Total
<i>Marine aquatic ecotoxicity</i>	1,4-DB eq	$2,38 \times 10^7$	$1,27 \times 10^8$	$1,41 \times 10^8$	$1,62 \times 10^8$	$1,88 \times 10^8$	$6,42 \times 10^8$
<i>Human toxicity</i>	1,4-DB eq	$2,79 \times 10^4$	$1,01 \times 10^5$	$1,14 \times 10^5$	$1,31 \times 10^5$	$1,52 \times 10^5$	$5,26 \times 10^5$
<i>Global warming (GWP100a)</i>	CO ₂ eq	$1,02 \times 10^4$	$9,32 \times 10^4$	$1,01 \times 10^5$	$1,12 \times 10^5$	$1,25 \times 10^5$	$4,41 \times 10^5$
<i>Terrestrial ecotoxicity</i>	1,4-DB eq	229	$1,24 \times 10^3$	$1,30 \times 10^3$	$1,42 \times 10^3$	$1,57 \times 10^3$	$5,76 \times 10^3$
<i>Acidification</i>	SO ₂ eq	57,4	320	372	433	504	$1,69 \times 10^3$
<i>Eutrophication</i>	PO ₄ eq	22	149	181	203	231	786

Tabel 3 Nilai Karakterisasi ReCiPe 2016 Midpoint

Kategori Dampak	Unit (kg)	WTP	SWRO	BWRO	MBP	WWTP	Total
<i>Terrestrial ecotoxicity</i>	1,4-DB eq	$1,17 \times 10^5$	$4,34 \times 10^5$	$4,91 \times 10^5$	$5,65 \times 10^5$	$6,57 \times 10^5$	$2,26 \times 10^6$
<i>Human non-carcinogenic toxicity</i>	1,4-DB eq	$2,36 \times 10^4$	$9,95 \times 10^4$	$1,12 \times 10^5$	$1,29 \times 10^5$	$1,51 \times 10^5$	$5,15 \times 10^5$
<i>Global warming</i>	CO ₂ eq	$1,05 \times 10^4$	$9,45 \times 10^4$	$1,02 \times 10^5$	$1,14 \times 10^5$	$1,27 \times 10^5$	$4,48 \times 10^5$
<i>Marine ecotoxicity</i>	1,4-DB eq	$1,75 \times 10^3$	$6,99 \times 10^3$	$7,76 \times 10^3$	$8,85 \times 10^3$	$1,32 \times 10^4$	$3,86 \times 10^4$

<i>Human carcinogenic toxicity</i>	1,4-DB eq	1,25×10 ³	8,60×10 ³	9,58×10 ³	1,04×10 ⁴	1,14×10 ⁴	4,12×10 ⁴
<i>Water consumption</i>	m ³	188	1,16×10 ³	1,37×10 ³	1,63×10 ³	1,91×10 ³	6,26×10 ³
<i>Terrestrial acidification</i>	SO ₂ eq	47,2	264	308	358	415	1,39×10 ³
<i>Marine eutrophication</i>	N eq	1,19	7,55	24,7	25,2	25,9	84,5

Berdasarkan karakterisasi yang dilakukan, nilai dampak tertinggi disumbangkan oleh *marine aquatic ecotoxicity* dan *terrestrial ecotoxicity* dengan nilai masing-masing sebesar 6,42×10⁸ dan 2,26×10⁶ kg 1,4-DB eq. Sebaran kategori dampak tertinggi lainnya adalah *human toxicity*, *human non-carcinogenic toxicity*, dan *global warming*. Dampak-dampak tersebut terkuantifikasi dari nilai pada masing-masing *elementary flow* yang dikalikan dengan faktor karakterisasi sesuai kategori dampak. Selanjutnya adalah tahapan normalisasi yang digunakan untuk menginformasikan besaran relatif dari masing-masing skor karakterisasi untuk kategori dampak yang berbeda, dengan menyatakannya secara relatif terhadap dampak referensi yang umum, yaitu satu dampak referensi dibandingkan terhadap setiap kategori dampak (Hauschild et al., 2018). Nilai normalisasi dari kedua metode ditunjukkan pada Tabel 4 dan Tabel 5.

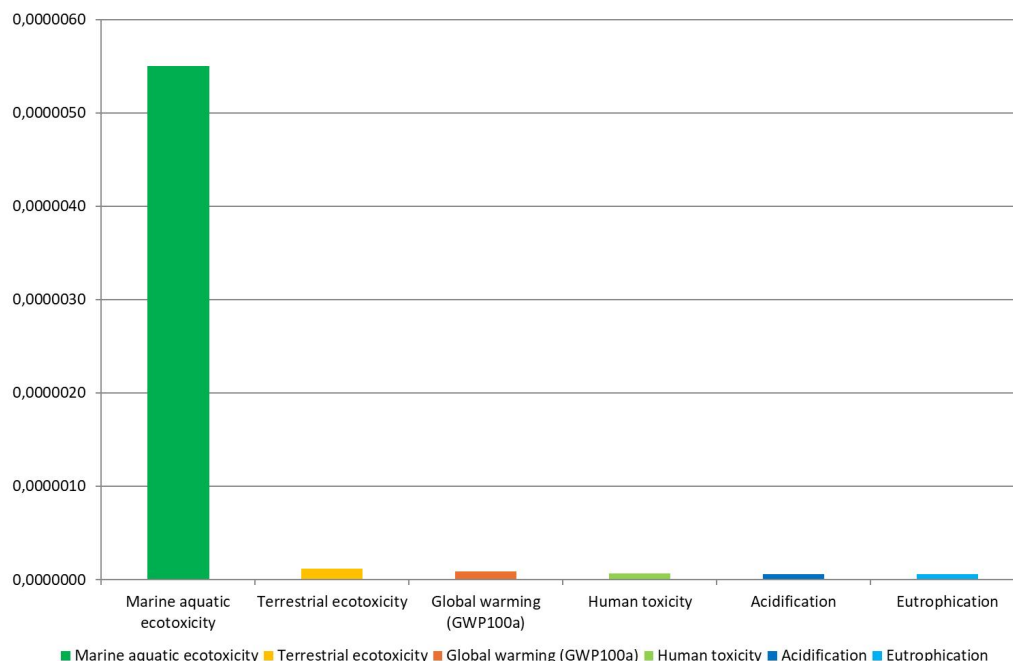
Tabel 4 Nilai Normalisasi CML IA Baseline

Kategori Dampak	WTP	SWRO	BWRO	MBP	WWTP	Total
<i>Marine aquatic ecotoxicity</i>	2,04×10 ⁻⁷	1,09×10 ⁻⁶	1,21×10 ⁻⁶	1,39×10 ⁻⁶	1,61×10 ⁻⁶	5,50×10 ⁻⁶
<i>Terrestrial ecotoxicity</i>	4,71×10 ⁻⁹	2,55×10 ⁻⁸	2,67×10 ⁻⁸	2,93×10 ⁻⁸	3,24×10 ⁻⁸	1,19×10 ⁻⁷
<i>Global warming (GWP100a)</i>	2,03×10 ⁻⁹	1,85×10 ⁻⁸	2,00×10 ⁻⁸	2,23×10 ⁻⁸	2,49×10 ⁻⁸	8,77×10 ⁻⁸
<i>Human toxicity</i>	3,60×10 ⁻⁹	1,30×10 ⁻⁸	1,47×10 ⁻⁸	1,69×10 ⁻⁸	1,96×10 ⁻⁸	6,78×10 ⁻⁸
<i>Acidification</i>	2,04×10 ⁻⁹	1,14×10 ⁻⁸	1,32×10 ⁻⁸	1,54×10 ⁻⁸	1,79×10 ⁻⁸	5,99×10 ⁻⁸
<i>Eutrophication</i>	1,67×10 ⁻⁹	1,13×10 ⁻⁸	1,37×10 ⁻⁸	1,54×10 ⁻⁸	1,75×10 ⁻⁸	5,96×10 ⁻⁸

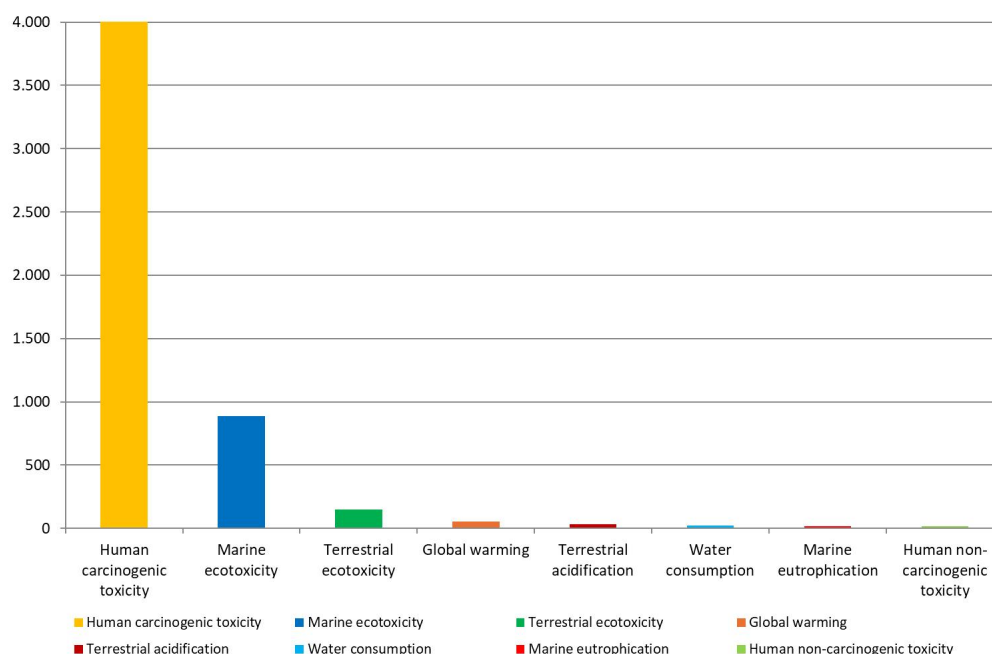
Tabel 5 Nilai Normalisasi ReCiPe 2016 Midpoint

Kategori Dampak	WTP	SWRO	BWRO	MBP	WWTP	Total
<i>Human carcinogenic toxicity</i>	121	835	930	1.010	1.110	4.006
<i>Marine ecotoxicity</i>	40,3	161,0	178,0	203,0	305,0	887,3
<i>Terrestrial ecotoxicity</i>	7,69	28,50	32,30	37,20	43,20	148,89
<i>Global warming</i>	1,31	11,80	12,80	14,20	15,90	56,01
<i>Terrestrial acidification</i>	1,15	6,45	7,51	8,72	10,10	33,93
<i>Water consumption</i>	0,70	4,35	5,12	6,11	7,18	23,46
<i>Marine eutrophication</i>	0,26	1,64	5,35	5,47	5,61	18,33
<i>Human non-carcinogenic toxicity</i>	0,76	3,18	3,58	4,14	4,82	16,48

Nilai normalisasi menunjukkan kategori dampak tertinggi adalah *marine aquatic ecotoxicity* dan *human carcinogenic toxicity* dengan nilai masing-masing $5,50 \times 10^{-6}$ dan $4,01 \times 10^3$. Perbedaan nilai dampak tertingginya dengan nilai yang diperoleh dari karakterisasi, terutama pada metode ReCiPe 2016, dikarenakan ReCiPe 2016 Midpoint (H) menggunakan referensi normalisasi yang berasal dari data global, yang terkait dengan seluruh wilayah geografis, dimana referensi ini akan membandingkan hasilnya sesuai dengan perkiraan emisi per kapita tahunan global (Prado et al., 2017). Hasil normalisasi tersebut divisualisasikan dalam bentuk grafik agar bisa dikomparasi satu sama lain, seperti pada Gambar 1 dan Gambar 2.



Gambar 1 Analisis Dampak Metode CML IA



Gambar 2 Analisis Dampak Metode ReCiPe 2016

Sebaran dampak mengkonfirmasi nilai karakterisasi, dimana dampak-dampak seperti *marine aquatic ecotoxicity*, *terrestrial ecotoxicity*, dan *global warming* menunjukkan skor yang tinggi, yang mengindikasikan ketiga dampak tersebut menjadi potensi ancaman pencemaran lingkungan sebagai efek dari pengolahan air. Adapun skor *human carcinogenic toxicity* yang relatif sejenis dengan dampak dari metode CML IA Baseline, yaitu *human toxicity*, menunjukkan nilai dampak yang sangat tinggi. Hal ini sesuai dengan studi yang dilakukan oleh Prado et al. (2017),

dimana referensi normalisasi CML IA baseline, yaitu EU25 menekankan dampak *marine aquatic ecotoxicity* sebagai dampak yang paling dominan dan berpengaruh dalam tata kelola pengelolaan air. Sementara ReCiPe 2016 Midpoint (H) dengan referensi normalisasi dari World menunjukkan kontribusi tertinggi dampak ditekankan pada *marine ecotoxicity* dan *human toxicity*. Penekanan pada dampak tertentu sebagai dampak dengan kontribusi tertinggi biasanya merupakan dampak yang saat ini menjadi perhatian global karena efeknya yang tidak bisa dibalikkan.

Melalui penilaian yang telah dilakukan, selanjutnya dilakukan penentuan titik dampak yang paling signifikan (*hotspot*). Penentuan dilakukan dengan menghitung presentase dari masing-masing unit proses yang terlibat untuk mengetahui titik mana yang memberikan nilai persentase yang paling signifikan. Penentuan *hotspot* ini ditunjukkan pada Tabel 6.

Tabel 6 Persentase Kontribusi Unit Proses

Kategori Dampak	Unit (kg)	WTP	SWRO	BWRO	MBP	WWTP
Metode CML IA Baseline						
<i>Marine aquatic ecotoxicity</i>	1,4-DB eq	3,71%	19,79%	21,97%	25,24%	29,29%
<i>Human toxicity</i>	1,4-DB eq	5,31%	19,21%	21,68%	24,91%	28,90%
<i>Global warming (GWP100a)</i>	CO ₂ eq	2,31%	21,11%	22,88%	25,37%	28,32%
<i>Terrestrial ecotoxicity</i>	1,4-DB eq	3,98%	21,53%	22,57%	24,66%	27,26%
<i>Acidification</i>	SO ₂ eq	3,40%	18,98%	22,06%	25,68%	29,89%
<i>Eutrophication</i>	PO ₄ eq	2,80%	18,96%	23,03%	25,83%	29,39%
Metode ReCiPe 2016 Midpoint						
<i>Terrestrial ecotoxicity</i>	1,4-DB eq	5,17%	19,17%	21,69%	24,96%	29,02%
<i>Human non-carcinogenic toxicity</i>	1,4-DB eq	4,58%	19,32%	21,74%	25,04%	29,31%
<i>Global warming</i>	CO ₂ eq	2,34%	21,09%	22,77%	25,45%	28,35%
<i>Marine ecotoxicity</i>	1,4-DB eq	4,54%	18,13%	20,13%	22,96%	34,24%
<i>Human carcinogenic toxicity</i>	1,4-DB eq	3,03%	20,86%	23,24%	25,22%	27,65%
<i>Water consumption</i>	m ³	3,00%	18,54%	21,89%	26,05%	30,52%
<i>Terrestrial acidification</i>	SO ₂ eq	3,39%	18,96%	22,12%	25,71%	29,81%
<i>Marine eutrophication</i>	N eq	1,41%	8,93%	29,22%	29,81%	30,64%

Berdasarkan Tabel 6, diketahui dari kedua metode, unit proses *Wastewater Treatment Plant* (WWTP) menunjukkan persentase paling besar diantara unit proses yang lain. Nilai persentase tertinggi ada pada *marine aquatic ecotoxicity* masing-masing 29,29% dan 34,24%. Dampaknya yang besar berhubungan dengan posisinya sebagai unit proses terakhir dari tahapan pengolahan yang juga mengolah residu dari berbagai macam limbah-limbah yang diproduksi oleh fasilitas seperti *boiler*, pembersihan bahan kimia, kebocoran dari bahan bakar, regenerasi *Condensate Polishing Plant* (CPP), dan lainnya. Salah satunya limbah *blowdown boiler* yang mengandung akumulasi bahan kimia seperti SHMP dan STPP sebagai anti skalan dan asam sitrat sebagai anti korosi. Hal ini menyebabkan konsentrasi polutannya sangat tinggi akibat dari penumpukan berbagai kontaminan seperti TSS serta ion-ion logam residu misalnya Fe yang berasal dari penggunaan koagulan FeCl₃ yang berkontribusi cukup besar terhadap dampak lingkungan (Bârjoveanu et al., 2019). Dampak lingkungan yang muncul salah satunya adalah peningkatan toksisitas di ekosistem akuatik, akibat dari adanya langkah penambahan basa kuat untuk menetralkan pH akibat adanya ion Cl⁻ dalam air limbahnya.

3.2. Strategi Mitigasi

Berdasarkan penilaian dampak, beberapa strategi mitigasi direncanakan untuk meningkatkan kinerja pengelolaan lingkungan, guna mengurangi dampak negatif ke lingkungan. Kontributor terbesar dari setiap kategori dampak didominasi oleh bahan kimia dan limbah. Beberapa program yang bisa diterapkan antara lain:

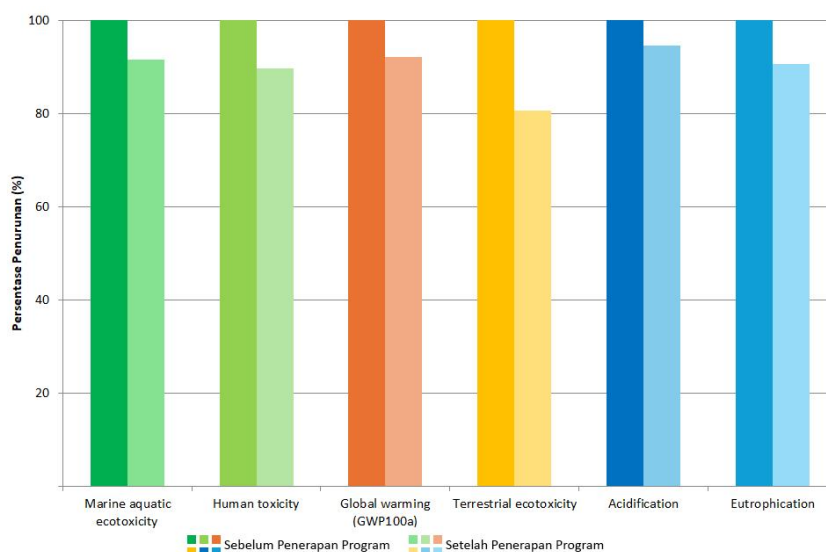
1. Penggantian jenis bahan kimia yang digunakan sebagai koagulan
Koagulan FeCl_3 diketahui memiliki sifat oksidatif yang tinggi dan cenderung meninggalkan residu besi yang tinggi dalam limbah yang diolah. Residu ini berperan dalam peningkatan toksisitas akuatik pada ekosistem air laut. Dalam jangka waktu yang panjang, residu ini dapat mempengaruhi penurunan kualitas organisme akuatik dan mengganggu rantai makanan. Koagulan $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ memiliki potensi untuk menggantikan FeCl_3 , dimana residu ekotoksiknya rendah, dengan efektivitas koagulasi yang cukup baik sehingga *sludge* yang dihasilkan pada bak koagulasi-flokulasi lebih rendah (Umar et al., 2016). Secara kimiawi, flok yang terbentuk dari ion Al^{3+} lebih stabil dan kurang reaktif terhadap ion lainnya dibandingkan Fe^{3+} . Al^{3+} cenderung akan terhidrolisis membentuk $\text{Al}(\text{OH})_3$ yang membentuk flok lebih padat dan mudah terendap, mengurangi volume air di lumpur. Pasangan ionnya yaitu SO_4^{2-} memiliki sifat yang lebih stabil pada suhu air rendah dibandingkan dengan Cl^- yang biasa berperan sebagai agen korosi. Walaupun begitu, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ bekerja pada kondisi pH terkontrol (6 – 7) dibandingkan FeCl_3 yang lebih tahan terhadap variasi pH (5 – 11) (Rachmawati et al., 2009).
2. Penggunaan kembali limbah kemasan bekas B3
Kemasan B3 menjadi salah satu limbah yang dihasilkan selama proses pengolahan air. Dimana setelah pengisian bahan kimia pada tangki injeksi bahan kimia dilakukan sepenuhnya, kemasan bekas ini akan dikumpulkan pada Tempat Penyimpanan Sementara (TPS) LB3. Setelah sekian timbulan terpenuhi maksimal masa simpan, limbah ini akan disetorkan ke pengolah limbah B3 untuk dikelola dengan cara insinerasi atau penimbunan di *landfill*. Pengolahan dengan cara seperti ini tentunya akan menimbulkan dampak seperti pelepasan gas berbahaya seperti dioksin dan CO_2 , yang berpotensi meningkatkan emisi karbon di udara dan peningkatan toksisitas akuatik akibat CO_2 yang larut dalam air. Penggunaan kembali kemasan bahan kimia dengan mengembalikan kepada pihak ketiga penyedia bahan kimia menjadi opsi yang paling tepat untuk mengurangi potensi dampak lingkungan dari kegiatan pengolahan limbah B3 tersebut. Selain itu dari sisi ekonomi, program ini berpotensi untuk mengurangi biaya pengolahan limbah kemasan bekas B3.
3. Pengolahan oli bekas menjadi oli kendaraan
Oli bekas merupakan produk samping dari kegiatan perawatan mesin dan peralatan selama proses pengolahan air. Oli bekas dianggap menjadi sumber pencemaran air dan tanah apabila tidak terkelola dengan baik karena kandungan logam berat dan polutan organiknya. Timbulan oli yang dihasilkan dari proses pengolahan air akan disimpan dalam TPS dan diserahkan ke pihak ketiga pengolah limbah B3 untuk diolah dengan cara konvensional, yaitu dibakar. Pembakaran ini akan melepaskan beberapa senyawa seperti CO_2 , CH_4 , dan gas rumah kaca lain yang berdampak pada peningkatan potensi pemanasan global. Padahal, oli bekas masih berpotensi untuk digunakan kembali melalui cara purifikasi oli, yang nantinya dapat digunakan menjadi oli kendaraan operasional kantor maupun alat berat. Pengolahan oli bekas dilakukan dengan kerja sama pihak ketiga yang secara khusus mengolah oli, melalui proses refinerasi untuk memisahkan fraksi oli dasar dan masing-masing fraksi akan dimurnikan kembali [Click or tap here to enter text.](#). Proses ini menggunakan metode distilasi *thin film evaporation* dan *hydrofinishing* yang digunakan untuk memisahkan total kandungan bahan pelumas dari residu yang sifatnya lebih berat. Minyak hasil *hydrofinishing* difraksionasi menjadi oli fraksi berat dan fraksi ringan sesuai kebutuhan produk akhir. Dilihat dari sudut pandang ekonomi, pengolahan oli bekas oleh pihak ketiga pengolah oli ini dapat meminimasi biaya pengolahan secara konvensional (pembakaran).

Program-program sebagai strategi mitigasi tersebut dibuat ke dalam skenario mitigasi dengan metode CML IA dan ReCiPe 2016 untuk menunjukkan efektivitas rencana program terhadap penurunan indikator dampak. Nantinya, persentase penurunan akan dibandingkan dengan operasional pengolahan air ketika berjalan secara normal sebagai *baseline*. Skenario mitigasi penerapan program lingkungan ditunjukkan pada Tabel 7.

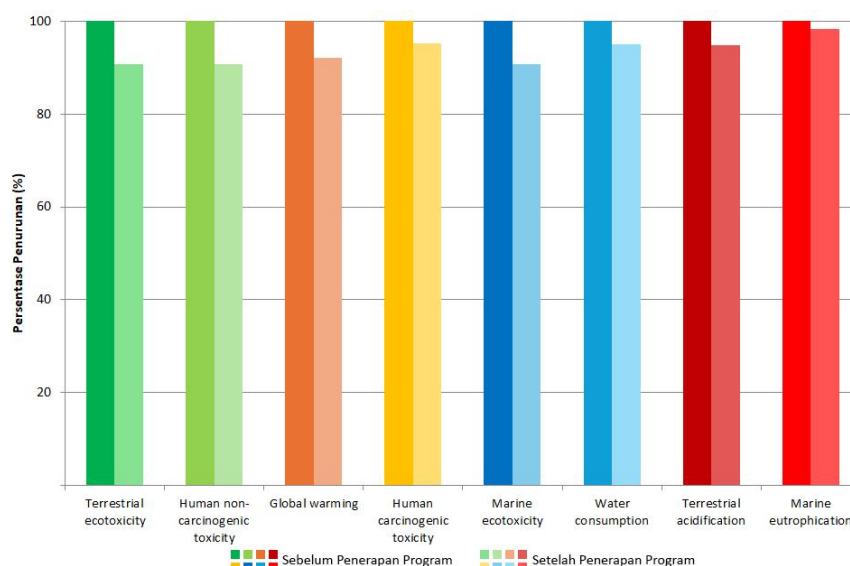
Tabel 7 Persentase Penurunan Dampak dari Penerapan Program Lingkungan

Metode CML IA Baseline				
Kategori Dampak	Unit (kg)	Nilai Dampak		Persentase Penurunan Dampak
		<i>Baseline</i>	Penerapan Program	
<i>Marine aquatic ecotoxicity</i>	1,4-DB eq	$6,42 \times 10^8$	$5,87 \times 10^8$	8,48%
<i>Human toxicity</i>	1,4-DB eq	$5,26 \times 10^5$	$4,71 \times 10^5$	10,36%
<i>Global warming (GWP100a)</i>	CO ₂ eq	$4,41 \times 10^5$	$4,06 \times 10^5$	7,93%
<i>Terrestrial ecotoxicity</i>	1,4-DB eq	$5,76 \times 10^3$	$4,64 \times 10^3$	19,37%
<i>Acidification</i>	SO ₂ eq	$1,69 \times 10^3$	$1,60 \times 10^3$	5,27%
<i>Eutrophication</i>	PO ₄ eq	786	713	9,31%
Metode ReCiPe 2016 Midpoint (H)				
<i>Terrestrial ecotoxicity</i>	1,4-DB eq	$2,26 \times 10^6$	$2,05 \times 10^6$	9,25%
<i>Human non-carcinogenic toxicity</i>	1,4-DB eq	$5,15 \times 10^5$	$4,68 \times 10^5$	9,17%
<i>Global warming</i>	CO ₂ eq	$4,48 \times 10^5$	$4,12 \times 10^5$	7,94%
<i>Marine ecotoxicity</i>	1,4-DB eq	$3,86 \times 10^4$	$3,50 \times 10^4$	9,20%
<i>Human carcinogenic toxicity</i>	1,4-DB eq	$4,12 \times 10^4$	$3,93 \times 10^4$	4,73%
<i>Water consumption</i>	m ³	$6,26 \times 10^3$	$5,94 \times 10^3$	5,04%
<i>Terrestrial acidification</i>	SO ₂ eq	$1,39 \times 10^3$	$1,32 \times 10^3$	5,21%
<i>Marine eutrophication</i>	N eq	84,5	83,2	1,60%

Persentase penurunan dampak paling signifikan terjadi pada kategori dampak *terrestrial ecotoxicity*, diikuti dengan *human toxicity*, *eutrophication*, dan *marine ecotoxicity* dengan masing-masing penurunannya sebesar 19,37%, 10,36%, 9,31%, dan 9,25%,. Secara visual, penurunan ini dikonversi dalam bentuk grafik seperti pada Gambar 3 dan Gambar 4.



Gambar 3 Pengaruh Penerapan Program Lingkungan terhadap Dampak Lingkungan (CML IA Baseline)



Gambar 4 Pengaruh Penerapan Program Lingkungan terhadap Dampak Lingkungan (ReCiPe 2016 Midpoint)

Skenario penerapan program menunjukkan pengurangan yang signifikan pada di hampir seluruh kategori dampak yang ditentukan dalam ruang lingkup LCA. Penurunan *terrestrial ecotoxicity* menjadi penurunan dengan persentase paling tinggi (19,33%) dikarenakan hampir seluruh kontributor dampak lingkungan yang teridentifikasi berperan besar dalam pencemaran daratan yang menyebabkan toksisitas terhadap makhluk hidup yang berinteraksi dengan sumber pencemaran tersebut. Selanjutnya penurunan terjadi secara bertahap dari masing-masing kategori dampak, yang walaupun tidak signifikan penurunan dampak *terrestrial ecotoxicity*, namun perubahan persentase yang tercapai mayoritas berada lebih dari 5%.

3.3. Penilaian Manajemen Risiko

Penilaian manajemen risiko dilakukan sebagai bentuk pendekatan yang disusun untuk mendukung hasil penilaian dampak LCA. Dalam penilaian yang dilakukan, potensi bahaya dan tingkat peluang terjadinya paparan dianalisis dengan mempertimbangkan risiko terhadap manusia dan makhluk hidup disekitarnya. Hal ini untuk menentukan seberapa penting manajemen risiko dilakukan untuk menghindari potensi dampak lingkungan yang dipengaruhi oleh penggunaan bahan kimia, timbulan produk samping berupa limbah B3, maupun pemicu lainnya (Muazu et al., 2021). Manajemen risiko dalam hal ini diterapkan untuk mendukung studi yang telah dilakukan, sehingga prioritas penerapan program dapat disusun agar tidak membebani pihak manajemen, terutama dari sisi finansial.

Diketahui berdasarkan penilaian risiko yang dilakukan, nilai risiko tertinggi yaitu kritis muncul pada aktivitas pengontrolan kualitas air selama proses pengolahan air laut, dengan nilai risiko 16. Jenis risiko ini diperoleh dari penggunaan bahan kimia terutama koagulan yang kurang ramah lingkungan, karena meninggalkan residu yang tidak mudah terdegradasi dengan baik selama tahap pengolahan limbah (Umar et al., 2016). Selain itu, munculnya timbulan kemasan bekas bahan kimia dalam jumlah besar. Selanjutnya, nilai risiko yang dianggap tinggi dan perlu dijadikan bahan pertimbangan antara lain dari aktivitas pembuangan limbah bekas kemasan bahan kimia, pembuangan air limbah ke lingkungan, dan *maintenance* peralatan dan mesin, dengan nilai dari ketiga risiko tersebut bekisar pada rentang nilai 9-12. Risiko tersebut memunculkan berbagai dampak lingkungan seperti pencemaran ekosistem darat dan akuatik, munculnya eutrofikasi pada perairan, serta potensi pemanasan global yang tinggi. Sehingga prioritas pelaksanaan program lingkungan disusun dengan urutan sebagai berikut:

1. Penggantian jenis bahan kimia yang digunakan sebagai koagulan
2. Penggunaan kembali limbah kemasan bekas B3
3. Pengolahan oli bekas menjadi oli kendaraan

4. KESIMPULAN

Studi yang dilakukan dengan menggunakan LCA mengungkapkan bahwa pengolahan air di pembangkit listrik tenaga uap berkontribusi secara signifikan terhadap dampak lingkungan, terutama melalui konsumsi bahan kimia dan timbunan limbah berbahaya. Dampak-dampak lingkungan dengan nilai dampak yang tinggi antara lain *marine aquatic ecotoxicity*, *terrestrial ecotoxicity*, *human carcinogenic toxicity*, dan *global warming potential*. Tingginya beberapa dampak tersebut mendorong munculnya strategi untuk menerapkan program lingkungan. Penerapan program lingkungan tersebut dikalkulasi persentase penerapannya dan dianalisis manajemen risikonya untuk menentukan prioritas pelaksanaan program. Sehingga diperoleh urutan rekomendasi pelaksanaan program lingkungan yaitu penggantian jenis bahan kimia yang digunakan sebagai koagulan dari FeCl_3 menjadi $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, penggunaan kembali limbah kemasan bekas B3, dan pengolahan oli bekas menjadi oli kendaraan.

DAFTAR PUSTAKA

- Afifah, R. N. (2022). *Evaluasi Dampak Lingkungan Akibat Emisi Polutan, Air, Limbah, serta Logam Berat pada Abu Terbang, Abu Dasar, dan Oli Bekas dari Kegiatan Produksi 1 kWh Listrik PLTU Batu Bara 660 MW PT Cirebon Electric Power* [Universitas Gadjah Mada]. <http://mipa.ugm.ac.id>,
- Ambarita, R. N. R. (2023). *Metode Life Cycle Assessment Sebagai Acuan Kinerja Proses Pengolahan Air Limbah PLTU (Studi Kasus: PT PJB Muara Karang)*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Bârjoveanu, G., Teodosiu, C., Gilcă, A.-F., Roman, I., & Fiore, S. (2019). Environmental Performance Evaluation of A Drinking Water Treatment Plant: A Life Cycle Assessment Perspective. *Environmental Engineering and Management Journal*, 18(2), 513–522. <http://www.eemj.icpm.tuiasi.ro/>; <http://www.eemj.eu>
- Exposto, L. A. S. M., & Sujaya, I. N. (2021). The Impacts of Hazardous and Toxic Waste Management: A Systematic Review. *Interdisciplinary Social Studies*, 1(2).
- Gao, J., Zhao, P., Zhang, H., Mao, G., & Wang, Y. (2018). Operational water withdrawal and consumption factors for electricity generation technology in China-A literature review. *Sustainability (Switzerland)*, 10(4). <https://doi.org/10.3390/su10041181>
- Gormley-Gallagher, A., James, S., & Pollard, T. (2011). *Guidelines for Environmental Risk Assessment and Management - Green Leaves III*. www.defra.gov.uk
- Hauschild, M. Z., Rosenbaum, R. K., & Olsen, S. I. (2018). *Life Cycle Assessment: Theory and Practice*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-56475-3>
- Jeong, H., Byeon, E., Kim, D. H., Maszczyk, P., & Lee, J. S. (2023). Heavy Metals and Metalloid in Aquatic Invertebrates: A Review of Single/Mixed Forms, Combination with Other Pollutants, and Environmental Factors. *Marine Pollution Bulletin*, 191. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.114959>
- Mahmud, M. F., Ismayana, A., & Yani, M. (2022). Life cycle assessment proses pengadaan bahan baku batubara pembangkit listrik tenaga uap Tidore. *Jurnal Teknologi Mineral Dan Batubara*, 18(1), 49–58. <https://doi.org/10.30556/jtmb.Vol18.No1.2022.1243>
- Mardi, N. H., Ean, L. W., Chua, K. H., & Malek, M. A. (2022). Application of Life Cycle Assessment (LCA) in measuring the environmental impact of coal-fired power plant - A review. *E3S Web of Conferences*, 347. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202234704021>
- Muazu, R. I., Rothman, R., & Maltby, L. (2021). Integrating life cycle assessment and environmental risk assessment: A critical review. *Journal of Cleaner Production*, 293. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126120>
- Nickel, L. (2023, March 22). *The Most Used LCI Databases for Life Cycle Assessment (LCA)*. Ecochain.
- Pintor, A. M. A., Vilar, V. J. P., Botelho, C. M. S., & Boaventura, R. A. R. (2016). Oil and Grease Removal from Wastewaters: Sorption Treatment as an Alternative to State-of-the-Art Technologies. A Critical Review. *Chemical Engineering Journal*, 297, 229–255. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.03.121>
- Prado, V., Wender, B. A., & Seager, T. P. (2017). Interpretation of comparative LCAs: external normalization and a method of mutual differences. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 22(12), 2018–2029. <https://doi.org/10.1007/s11367-017-1281-3>
- Rachmawati, S. W., Iswanto, B., & Winarni. (2009). Pengaruh pH pada Proses Koagulasi dengan Koagulan Aluminium Sulfat dan Ferri Klorida. *Jurnal Teknik Lingkungan*, 5(2), 40–45.
- Rono, A. K. (2017). Evaluation of TSS, BOD5, and TP in Sewage Effluent Receiving Sambul River. *J Pollut Eff Cont*, 5, 189. <https://doi.org/10.4176/2375-4397.1000189>
- Umar, M., Roddick, F., & Fan, L. (2016). Comparison of coagulation efficiency of aluminium and ferric-based coagulants as pre-treatment for UVC/H₂O₂ treatment of wastewater RO concentrate. *Chemical Engineering Journal*, 284, 841–849. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.08.109>
- van der Wiel, K., Bloomfield, H. C., Lee, R. W., Stoop, L. P., Blackport, R., Screen, J. A., & Selten, F. M. (2019). The influence of weather regimes on European renewable energy production and demand. *Environmental Research Letters*, 14(9), 094010. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab38d3>
- Wibawa, B. S. S., Iswara, A. P., & Boedisantoso, R. (2020). Impact Assessment of Coal Power Plant Using Life Cycle Assessment (LCA). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 506(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/506/1/012023>

- Yan, H., Wu, L., Wang, Y., Irfan, M., Jiang, C., & Xu, T. (2020). Ammonia Capture from Wastewater with A High Ammonia Nitrogen Concentration by Water Splitting and Hollow Fiber Extraction. *Chemical Engineering Science*, 227. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2020.115934>
- Yaqub, M., Nguyen, M. N., & Lee, W. (2022). Treating reverse osmosis concentrate to address scaling and fouling problems in zero-liquid discharge systems: A scientometric review of global trends. *Science of the Total Environment*, 844. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157081>

LAMPIRAN

1. Penilaian Manajemen Risiko

No	Aktivitas	Jenis Risiko	Probabilitas (P)	Keparahan (S)	Nilai Risiko (RV = P x S)	Klasifikasi
1	Pengontrolan kualitas air selama proses pengolahan air laut	1. Penggunaan bahan kimia yang kurang ramah lingkungan 2. Timbulan kemasan bekas bahan kimia dalam jumlah besar	4	4	16	Kritis
2	Proses filtrasi membran	Timbulan limbah dari media filter dan resin penukar ion	5	1	5	Menengah
3	Pembuangan limbah bekas kemasan bahan kimia	Pencemaran ekosistem darat dan akuatik	4	3	12	Tinggi
4	Penanganan dan penyimpanan bahan kimia dan limbah B3	Kebocoran/tumpahan zat yang bersifat berbahaya atau beracun	2	3	6	Menengah
5	Pembuangan air limbah ke lingkungan	Pencemaran lingkungan terhadap ekosistem akuatik dan peningkatan potensi eutrofikasi	3	3	9	Tinggi
6	Maintenance peralatan dan mesin	Timbulan limbah oli dan limbah terkontaminasi B3	4	3	12	Tinggi

2. Skala Matriks Risiko

Matriks Risiko		Likelihood				
		1 <i>Rare</i>	2 <i>Unlikely</i>	3 <i>Possible</i>	4 <i>Likely</i>	5 <i>Almost Certain</i>
Severity	1 <i>Insignificant</i>	1	2	3	4	5
	2 <i>Minor</i>	6	7	8	9	10
	3 <i>Moderate</i>	11	12	13	14	15
	4 <i>Major</i>	16	17	18	19	20
	5 <i>Fatal</i>	21	22	23	24	25

3. Skala Probabilitas

Tingkat	Kriteria	Keterangan
1	Jarang (<i>Rare</i>)	Sesuatu yang hampir tidak mungkin terjadi
2	Kecil Kemungkinan (<i>Unlikely</i>)	Sebuah peristiwa yang tidak terduga yang mungkin terjadi untuk suatu tujuan
3	Mungkin (<i>Possible</i>)	Sebuah kejadian yang bisa terjadi sesekali karena kondisi tertentu
4	Kemungkinan (<i>Likely</i>)	Sebuah kejadian yang bisa terjadi lebih dari sekali dalam jangka waktu tertentu
5	Hampir Pasti (<i>Almost Certain</i>)	Sebuah kejadian yang bisa terjadi lebih dari sekali seiring berjalannya waktu

4. Skala Keparahan

Tingkat	Kriteria	Keterangan
1	Tidak signifikan (<i>Insignificant</i>)	Dampak yang mencegah penyakit dan cedera sementara.
2	Kecil (<i>Minor</i>)	Luka ringan yang dapat diobati dengan obat
3	Sedang (<i>Moderate</i>)	Cedera ringan yang memerlukan perhatian ekstra untuk sembuh
4	Besar (<i>Major</i>)	Fraktur, jahitan, atau gangguan fisik sementara adalah kemungkinan efeknya.
5	Fatal (<i>Fatal</i>)	Dampaknya dapat menyebabkan amputasi, kecacatan seumur hidup, atau bahkan kematian.