

BAB VIII

LIFE CYCLE ASSESSMENT

Aktivitas industri memiliki kontribusi yang cukup besar terhadap pencemaran lingkungan, penggunaan bahan baku sebanyak 40%, limbah padat 25%, limbah cair 25% dan efek lainnya seperti efek rumah kaca sebesar 40% (Muhammad & Syahrullah, 2022; Nurfatimah, 2023; Rosyadi -Isnaini & Wulandari, 2021). Terdapat hanya 2% limbah industri manufaktur yang saat ini dikelola dan 98% dari limbah tersebut belum dikelola (Muhammad & Syahrullah, 2022). Proses produksi tentunya akan menghasilkan limbah, baik itu cair, padat ataupun uap. Penilaian dampak lingkungan dilakukan dengan menilai energi dan emisi yang dihasilkan selama proses produksi. Hal ini merupakan salah satu usaha untuk menciptakan produksi yang ramah lingkungan dengan mempertimbangkan dampak yang ditimbulkan oleh daur hidup produk. Proses produksi adalah aktivitas yang berguna untuk dapat memberikan nilai tambah pada barang-barang yang melibatkan faktor-faktor produksi bersamaan (Effendy et al., 2023; Muin et al., 2017). Perlunya suatu penerapan metode untuk dapat menganalisis terkait penggunaan energi, limbah dan emisi yang dihasilkan dari sebuah proses produksi. Salah satu metode yang sering digunakan untuk dapat mengevaluasi hal tersebut adalah *Life Cycle Assessment* (LCA).

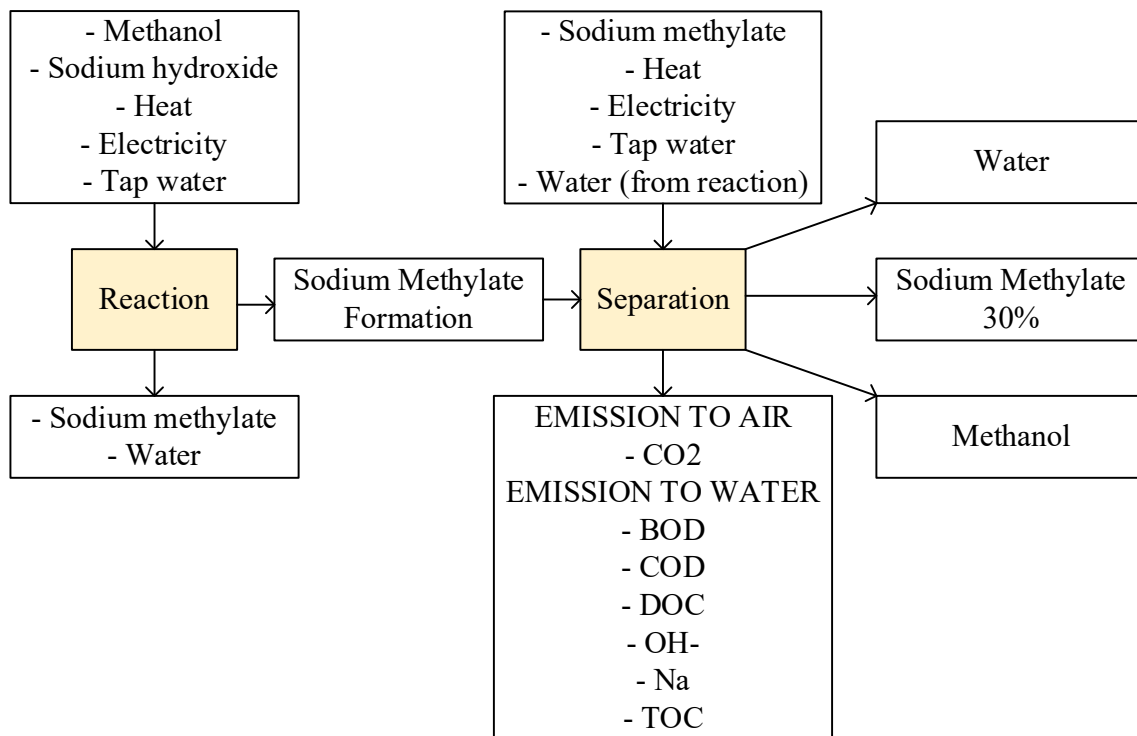
Metode *Life Cycle Assessment* (LCA) dilakukan dengan ruang lingkup gate to gate kemudian dibantu dengan alat ukur perhitungan dan database *Software OpenLCA* versi 2.6. Berdasarkan (ISO 14040 tahun 2006) terdapat 4 tahapan LCA yakni:

8.1. Goal and Scope

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui dampak pada lingkungan yang disebabkan dari kegiatan proses produksi Sodium Methylate berdasarkan penilaian dampak menggunakan ReCiPe 2016.

8.2. Life Cycle Inventory (LCI)

Pada tahap ini digunakan untuk mengetahui input material dan energi yang digunakan, serta output dari proses produksi sodium methylate. Setelah diketahui input dan output produksi sodium methylate selanjutnya akan dianalisis kedalam *Software OpenLCA* versi 2.6. *System boundary* yang digunakan pada proses produksi sodium methylate adalah *gate to gate* yang dapat dilihat pada Gambar 8.1.



Gambar 8. 1. *System boundary* dari proses produksi sodium methylate

Dari rancangan pada Gambar 8.1. selanjutnya akan dimasukkan data proses yang ada pada Inventory Data Tabel 8.1.

Tabel 8. 1. *Inventory data* dari proses produksi sodium methylate

Kategori	Parameter	Unit	Sodium methylate <i>production</i>
Reaction			
Input material and energy	Methanol	kg	874
	Sodium hydroxide (NaOH)	kg	226
	Water	m ³	20
	Steam (heat)	MJ	300
	Electricity	kWh	20
Output product	Sodium methylate	kg	1000
	Water	kg	100
Separation			
Input material and energy	Crude Sodium methylate	kg	1000
	Heat (reboiler)	MJ	1700
	Electricity	kWh	30
	Cooling water	m ³	24
	Tap Water	kg	80
Output Product	Sodium Metylate	kg	1000
	Emission to air		
	Methanol vapor	kg	1.25

Kategori	Parameter	Unit	Sodium methylate <i>production</i>
	<i>Carbon dioxide (CO₂)</i>	kg	837.8
	<i>Water</i>	m ³	9.3
	<i>Emission to water</i>		
	<i>BOD5</i>	kg	0.23
	<i>COD</i>	kg	330
	<i>DOC</i>	kg	1.18
	<i>Hydroxide</i>	kg	1.74
	<i>Methanol</i>	kg	3.16
	<i>Sodium ion</i>	kg	2.36
	<i>TOC</i>	kg	1.18
	<i>Water</i>	m ³	14.7

8.3. Life Cycle Impact Assessment (LCIA)

Tahapan ketiga dari LCA adalah melakukan penilaian dampak dari proses produksi sodium methylate terhadap lingkungan. Analisis dilakukan menggunakan metode ReCiPe 2016 Midpoint (H) dengan basis produksi 1000 kg sodium methylate. Metode ini digunakan untuk mengidentifikasi berbagai kategori dampak lingkungan secara lebih rinci pada tingkat midpoint, sehingga memungkinkan evaluasi kontribusi masing-masing aliran material dan energi terhadap lingkungan.

Berdasarkan hasil perhitungan menggunakan *software openLCA* versi 2.6, diperoleh beberapa kategori dampak utama yang signifikan, yaitu *marine ecotoxicity*, *freshwater ecotoxicity*, *human carcinogenic toxicity*, *human non-carcinogenic toxicity*, dan *terrestrial ecotoxicity* yang terlihat pada gambar 8.2, 8.3, dan 8.4.

Reaction

▼ Normalization

Impact category	Amount	
Marine ecotoxicity	32.29841	
Freshwater ecotoxicity	20.20709	
Human carcinogenic toxicity	12.71652	
Human non-carcinogenic toxicity	3.69726	
Terrestrial ecotoxicity	1.95871	
Fossil resource scarcity	0.75790	
Freshwater eutrophication	0.30896	
Ozone formation, Terrestrial ecosystems	0.11785	
Global warming	0.11452	
Ozone formation, Human health	0.09734	
Ionizing radiation	0.08870	
Terrestrial acidification	0.06665	
Fine particulate matter formation	0.04799	
Water consumption	0.04471	
Stratospheric ozone depletion	0.01084	
Marine eutrophication	0.00469	
Land use	0.00124	
Mineral resource scarcity	1.58919E-5	

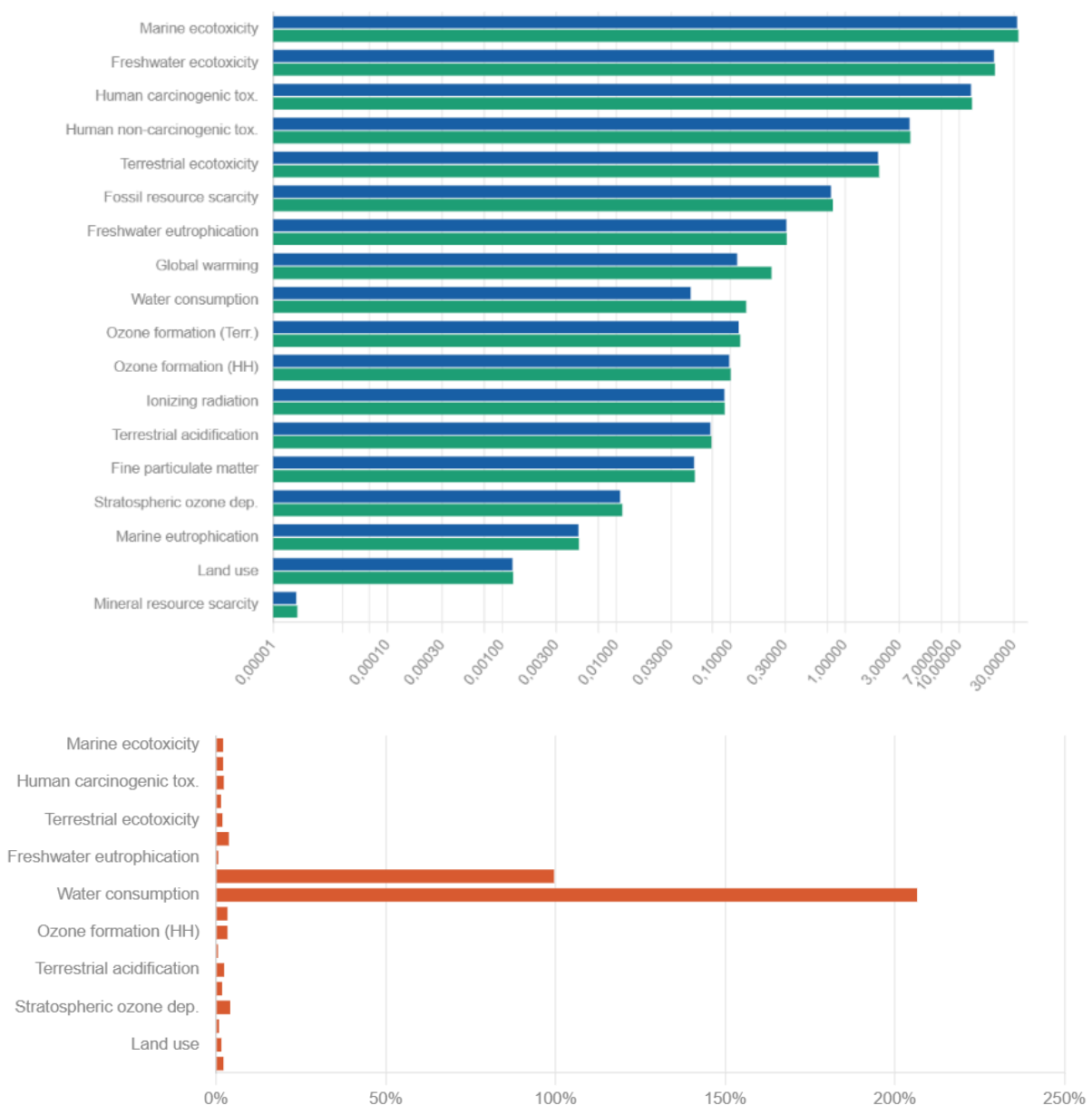
Gambar 8. 2 Hasil Normalisasi *Reaction System*

Separation

▼ Normalization

Impact category	Amount	
Marine ecotoxicity	32.98752	
Freshwater ecotoxicity	20.62509	
Human carcinogenic toxicity	13.01171	
Human non-carcinogenic toxicity	3.75257	
Terrestrial ecotoxicity	1.99668	
Fossil resource scarcity	0.78663	
Freshwater eutrophication	0.31117	
Global warming	0.22856	
Water consumption	0.13710	
Ozone formation, Terrestrial ecosystems	0.12181	
Ozone formation, Human health	0.10061	
Ionizing radiation	0.08923	
Terrestrial acidification	0.06828	
Fine particulate matter formation	0.04887	
Stratospheric ozone depletion	0.01130	
Marine eutrophication	0.00473	
Land use	0.00126	
Mineral resource scarcity	1.62463E-5	

Gambar 8. 3 Hasil Normalisasi *Separation System*



Gambar 8. 4 Grafik Hasil Normalisasi *Reaction* dan *Separation System*

8.3.1. *Marine Ecotoxicity*

Marine ecotoxicity merupakan kategori dampak dengan nilai normalisasi tertinggi pada kedua tahap proses, yaitu sebesar 32,298 pada tahap reaksi dan 32,988 pada tahap separasi. Tingginya nilai ini secara konsisten di kedua tahap mengindikasikan bahwa seluruh rangkaian proses produksi sodium methylete memberikan kontribusi signifikan terhadap potensi pencemaran ekosistem laut. Dalam konteks LCA, dampak ekotoksistas dievaluasi melalui kombinasi *fate factor*, *ecological exposure factor*, *ecotoxicity effect factor*, dan *damage factor* yang mencerminkan distribusi serta transformasi senyawa kimia di lingkungan. Pada proses produksi sodium methylete, sumber utama dampak ini berasal dari emisi senyawa

toksik dalam rantai pasok bahan baku. Studi LCA terhadap produk berbasis methanol menunjukkan bahwa listrik merupakan kontributor utama terhadap *marine ecotoxicity*, yang menyumbang sekitar 48% dari total dampak pada produksi methanol (Kyaw et al., 2024). Hal ini relevan mengingat proses produksi NaOH melalui elektrolisis klorin-alkali merupakan salah satu proses industri dengan konsumsi energi listrik tertinggi (Hou et al., 2018). Industri klorin-alkali termasuk dalam proses dengan konsumsi energi tertinggi dan menghasilkan emisi polutan yang berdampak serius terhadap lingkungan dan kehidupan manusia. Sedikit peningkatan nilai pada tahap separasi dibandingkan reaksi kemungkinan disebabkan oleh konsumsi energi tambahan pada operasi distilasi yang secara tidak langsung memperbesar jejak lingkungan terhadap ekosistem laut.

8.3.2. *Freshwater ecotoxicity*

Freshwater ecotoxicity berada di posisi kedua pada kedua tahap, dengan nilai normalisasi sebesar 20,207 pada tahap reaksi dan 20,625 pada tahap separasi. Nilai yang relatif serupa di antara kedua tahap menunjukkan bahwa sumber utama dampak bersifat inheren terhadap bahan baku yang digunakan, bukan semata-mata akibat kondisi operasi. Dalam kerangka penilaian LCA, emisi senyawa kimia ke lingkungan pada semua tahap siklus hidup produk berpotensi menyebabkan dampak ekotoksik terhadap ekosistem akuatik dan terestrial, yang berdampak pada kualitas ekosistem. Methanol sebagai bahan baku utama diketahui memiliki toksisitas nyata terhadap organisme air tawar. Studi toksikologi menunjukkan bahwa *Moina micrura* (*krustacea cladocera*) merupakan organisme yang paling sensitif terhadap paparan methanol dengan nilai LC50 sebesar 4,82 g/L, diikuti oleh ikan *Oreochromis mossambicus* dengan LC50 15,32 g/L, dan cacing *oligochaeta Branchiura sowerbyi* dengan LC50 54,89 g/L. Selain itu, paparan kronis methanol pada konsentrasi *sublethal* juga terbukti berdampak pada ekosistem secara keseluruhan. Paparan kronis selama 90 hari pada konsentrasi 47,49 mg/L atau lebih menyebabkan penurunan pertumbuhan, indeks kematangan, dan fekunditas ikan, serta penurunan produktivitas primer, populasi fitoplankton, dan alkalinitas air (Kaviraj et al., 2004). Sedikit peningkatan nilai pada tahap separasi kemungkinan berkaitan dengan penggunaan utilitas tambahan serta potensi peningkatan emisi dari operasi distilasi yang dapat mencemari badan air tawar di sekitar fasilitas produksi.

8.3.3. *Human Carcinogenic Toxicity*

Human carcinogenic toxicity berada di posisi ketiga dengan nilai normalisasi sebesar 12,717 pada tahap reaksi dan 13,012 pada tahap separasi. Nilai yang sedikit lebih tinggi pada tahap separasi mengindikasikan bahwa proses pemisahan turut berkontribusi pada peningkatan potensi paparan senyawa karsinogenik, kemungkinan akibat emisi uap methanol yang lebih intensif selama operasi distilasi. Dalam metodologi LCA, kategori *human toxicity (cancer)* mendeskripsikan pelepasan zat-zat toksik selama siklus hidup produk atau proses yang berpotensi berkontribusi terhadap perkembangan kanker, dan umumnya diekspresikan dalam satuan kilogram 1,4-dichlorobenzene equivalents (kg 1,4-DCB-eq) (Clara, 2025). Studi LCA yang dilakukan terhadap produksi sodium hydroxide menunjukkan bahwa di antara dampak lingkungan yang signifikan untuk produksi satu kilogram sodium hydroxide adalah konsumsi energi fosil, pemanasan global, *aquatic ecotoxicity*, *acidification*, dan *human toxicity (carcinogenicity)* sebesar 0,4927 g 1,4-DCB equivalents, di mana sebagian besar dampak lingkungan berasal dari konsumsi energi listrik dan gas alam. Kondisi ini mempertegas bahwa rantai produksi NaOH, yang merupakan salah satu bahan baku utama sodium methylete, menjadi salah satu kontributor penting terhadap kategori dampak ini (Thannimalay et al., 2013). Pengendalian emisi yang ketat pada kedua tahap proses, meliputi sistem ventilasi yang memadai, penggunaan alat pelindung diri, serta prosedur penanganan bahan kimia yang sesuai standar, menjadi langkah krusial untuk meminimalkan risiko karsinogenik bagi pekerja maupun masyarakat sekitar pabrik

8.3.4. *Human Non-Carcinogenic Toxicity*

Human non-carcinogenic toxicity menempati posisi keempat dengan nilai normalisasi sebesar 3,697 pada tahap reaksi dan 3,753 pada tahap separasi. Nilai yang relatif konsisten di kedua tahap menunjukkan bahwa risiko ini bersifat melekat pada penggunaan methanol sebagai bahan baku utama di seluruh rangkaian proses. Mekanisme toksisitas non-karsinogenik methanol pada manusia telah dipahami dengan baik secara ilmiah. Methanol bersifat toksik melalui dua mekanisme: pertama, sebagai depresan sistem saraf pusat; dan kedua, melalui proses toksikasi di mana methanol dimetabolisme menjadi asam format melalui formaldehida, suatu proses yang diinisiasi oleh enzim *alcohol dehydrogenase* di hati (Ashurst et al., 2025). Lebih lanjut, asam format sebagai produk oksidasi serial methanol secara langsung merusak berbagai sistem organ, terutama sistem saraf pusat, dan bertanggung jawab atas

terjadinya asidosis metabolik dengan *anion gap* yang meningkat; retina diketahui sangat sensitif terhadap senyawa ini. Dalam konteks industri, pada kondisi industri, inhalasi uap methanol merupakan risiko kesehatan yang nyata karena methanol digunakan dalam produksi formaldehida, pemrosesan *shellac*, serta sebagai ekstrakstan dalam proses kimia. Sedikit peningkatan nilai pada tahap separasi kemungkinan disebabkan oleh potensi penguapan methanol yang lebih tinggi selama proses distilasi, sehingga memperbesar risiko paparan inhalasi bagi pekerja di unit separasi.

8.3.5. *Terrestrial ecotoxicity*

Terrestrial ecotoxicity berada di posisi kelima dengan nilai normalisasi sebesar 1,959 pada tahap reaksi dan 1,997 pada tahap separasi. Kedua nilai ini mencerminkan potensi toksisitas terhadap ekosistem darat, termasuk tanah dan seluruh organisme yang hidup di dalamnya, sebagai akibat emisi dari proses produksi maupun rantai pasok bahan baku. Dalam kerangka penilaian LCA, dampak ekotoksikologi terhadap organisme tanah relevan untuk dikaji pada sistem produk yang mencakup pelepasan polutan, aplikasi lumpur selokan, deposisi emisi udara, dan/atau penggunaan air irigasi yang terkontaminasi oleh emisi atau deposisi senyawa kimia. Penilaian dampak ekotoksitas terestrial dalam LCA dilakukan melalui pendekatan karakterisasi faktor yang memperhitungkan perilaku senyawa di lingkungan. Dalam LCIA, dampak suatu senyawa yang diemisikan ke kompartemen lingkungan diestimasi dengan mengalikan massa senyawa yang diemisikan dengan *characterization factor*, yang diperoleh dari perkalian *fate factor* dan *effect factor* yang menyatakan efek senyawa terhadap organisme per satuan konsentrasi paparan. Peningkatan kecil nilai *terrestrial ecotoxicity* pada tahap separasi dibandingkan reaksi kemungkinan berkaitan dengan konsumsi energi yang lebih tinggi pada unit distilasi. Studi LCA menunjukkan bahwa dalam metode penilaian ReCiPe, ekotoksitas terestrial didominasi oleh emisi dari proses produksi, termasuk penggunaan asam sulfat dan uap dalam proses konversi, sementara *marine ecotoxicity* didominasi oleh emisi logam berat dan asam sulfat ke udara. Meskipun nilai *terrestrial ecotoxicity* lebih rendah dibandingkan kategori toksisitas perairan, dampak ini tetap perlu dikelola secara serius melalui penanganan limbah padat dan cair yang komprehensif serta pengendalian emisi ke udara di seluruh unit operasi pabrik sodium methyate (Haye et al., 2007).

8.3.6. Kategori Dampak yang Tidak Signifikan

Beberapa kategori menunjukkan nilai sangat kecil atau nol, seperti:

- *Fossil resource scarcity*
- *Freshwater eutrophication*
- *Ozone formation, Terrestrial ecosystems*
- *Global warming*
- *Ozone formation, Human health*
- *Ionizing radiation*
- *Terrestrial acidification*
- *Fine particulate matter formation*
- *Water consumption*
- *Stratospheric ozone depletion*
- *Marine eutrophication*
- *Land use*
- *Mineral resource scarcity*

Kelompok kategori dampak pertama yang tergolong tidak signifikan meliputi *fossil resource scarcity*, *freshwater eutrophication*, *global warming*, *water consumption*, serta *ozone formation* baik pada ekosistem terestrial maupun kesehatan manusia. Pada kedua tahap proses, *fossil resource scarcity* mencatat nilai normalisasi sebesar 0,758 (reaksi) dan 0,787 (separasi), yang mencerminkan konsumsi bahan bakar fosil terutama dari kebutuhan energi proses dan rantai produksi bahan baku. Dalam kerangka ReCiPe 2016, metode ini mengimplementasikan *human health*, *ecosystem quality*, dan *resource scarcity* sebagai tiga area perlindungan utama, di mana karakterisasi dampak dikembangkan pada skala global untuk mencerminkan sifat lintas batas dari berbagai kategori dampak lingkungan (Huijbregts et al., 2017). Nilai *global warming* yang relatif kecil (0,115 pada reaksi dan 0,229 pada separasi) mengindikasikan bahwa kontribusi emisi gas rumah kaca dari kedua tahap proses ini masih terbatas, meskipun nilai yang lebih tinggi pada tahap separasi mengisyaratkan kebutuhan energi termal yang lebih besar selama operasi distilasi. Untuk *freshwater eutrophication*, dalam metodologi LCA, fosfor diasumsikan sebagai faktor pembatas di ekosistem air tawar, sementara nitrogen berperan sebagai faktor pembatas di ekosistem laut, sehingga karakterisasi dampak eutrofikasi pada kedua kompartemen lingkungan ini memerlukan pendekatan pemodelan yang berbeda. Nilai *freshwater eutrophication* yang kecil (0,309 dan 0,311) menunjukkan bahwa emisi fosfor dari kedua tahap proses masih terkendali dengan baik. Sementara itu, nilai *ozone formation*

yang rendah (berkisar 0,097–0,122) konsisten dengan karakteristik proses yang tidak menggunakan atau menghasilkan senyawa organik volatil dalam jumlah besar. Ozon troposfer terbentuk dari reaksi nitrogen oksida dan senyawa organik volatil di bawah paparan sinar matahari, dan dampaknya mencakup gangguan pernapasan pada manusia serta kerusakan pada vegetasi dan hasil pertanian. Nilai *water consumption* yang sedikit lebih tinggi pada tahap separasi (0,137) dibandingkan reaksi (0,045) mengkonfirmasi bahwa operasi distilasi memerlukan utilitas air yang lebih besar, meskipun secara keseluruhan masih dalam kategori dampak yang tidak signifikan.

Kelompok kategori dampak kedua yang juga tidak signifikan mencakup *ionizing radiation*, *terrestrial acidification*, *fine particulate matter formation*, *stratospheric ozone depletion*, *marine eutrophication*, *land use*, dan *mineral resource scarcity*. Nilai *ionizing radiation* yang kecil (sekitar 0,089) pada kedua tahap umumnya berasal dari konsumsi energi listrik yang sebagian bersumber dari pembangkit listrik tenaga nuklir dalam campuran energi di jaringan listrik yang digunakan. *Terrestrial acidification* (0,067–0,068) dan *fine particulate matter formation* (0,048–0,049) berkaitan erat dengan emisi SO₂ dan NO_x dari pembakaran bahan bakar, di mana menurut survei pakar LCA, *particulate matter* dinilai sebagai kategori dampak terpenting kedua terhadap kesehatan manusia setelah *human toxicity cancer*, sehingga meskipun nilainya kecil, kategori ini tetap relevan untuk dimonitor dalam pengelolaan lingkungan industri. *Stratospheric ozone depletion* mencatat nilai yang sangat kecil (0,011–0,013), yang sejalan dengan karakteristik proses produksi sodium methylete yang tidak melibatkan penggunaan senyawa perusak ozon seperti CFC atau HCFC secara langsung. Lapisan ozon stratosfer melindungi bumi dari radiasi ultraviolet berbahaya (UV-B), dan penipisannya dalam LCA diekspresikan dalam satuan kilogram CFC-11 *equivalent* (kg CFC-11 eq) yang mencerminkan potensi relatif suatu senyawa dalam merusak lapisan ozon. *Marine eutrophication* (0,005), *land use* (0,001–0,002), dan *mineral resource scarcity* (sekitar $1,6 \times 10^{-5}$) merupakan kategori dengan nilai paling kecil di antara seluruh kategori dampak yang dianalisis. Secara keseluruhan, meskipun nilai-nilai ini tergolong tidak signifikan dalam konteks normalisasi global, kategori-kategori tersebut tetap perlu dipantau sebagai bagian dari strategi pengelolaan lingkungan yang komprehensif dan berkelanjutan, mengingat sifatnya yang kumulatif dalam jangka panjang (Morelli et al., 2018).

8.3.7. Interpretasi dan Rekomendasi

Secara keseluruhan, hasil normalisasi LCA pada tahap reaksi maupun separasi dalam proses produksi sodium methylete menunjukkan bahwa kategori toksisitas khususnya *marine ecotoxicity*, *freshwater ecotoxicity*, *human carcinogenic toxicity*, *human non-carcinogenic toxicity*, dan *terrestrial ecotoxicity* merupakan penyumbang dampak lingkungan yang paling dominan dan perlu mendapatkan perhatian prioritas. Menurut (ISO 14040 tahun 2006), interpretasi merupakan fase LCA di mana temuan dari analisis inventori dan penilaian dampak dipertimbangkan secara bersama-sama untuk menghasilkan kesimpulan, menjelaskan keterbatasan, serta memberikan rekomendasi yang konsisten dengan tujuan dan ruang lingkup studi (Castellani et al., 2017). Tingginya nilai pada kelima kategori toksisitas tersebut mengindikasikan bahwa sumber dampak utama bersifat inheren terhadap karakteristik bahan baku yang digunakan, terutama methanol dan sodium hydroxide, sehingga upaya perbaikan perlu difokuskan pada pengelolaan rantai pasok hulu. Dalam kerangka interpretasi LCA, fase ini bertujuan mengidentifikasi dampak utama lingkungan yaitu tahapan atau material yang berkontribusi paling besar terhadap dampak dan merekomendasikan perubahan, misalnya dengan beralih ke sumber energi terbarukan pada fase produksi beremisi tinggi atau memilih bahan baku dengan jejak lingkungan yang lebih rendah. Berdasarkan hal ini, rekomendasi utama yang dapat diberikan meliputi: (1) pemilihan pemasok methanol dan NaOH yang menggunakan sumber energi terbarukan dalam proses produksinya guna menekan dampak toksisitas dari rantai pasok hulu; (2) penerapan sistem pengendalian emisi yang ketat pada unit reaksi dan separasi, termasuk sistem scrubber dan ventilasi tertutup, untuk meminimalkan paparan uap methanol terhadap pekerja maupun lingkungan sekitar; serta (3) pengelolaan limbah cair secara terpadu sebelum dibuang ke badan air guna mencegah pencemaran ekosistem perairan. Upaya pengurangan tekanan kimiawi terhadap kesehatan manusia dan lingkungan merupakan bagian integral dari agenda keberlanjutan global, di mana panduan untuk menurunkan dampak toksisitas dari emisi senyawa kimia secara konsisten telah menjadi fokus utama pengembangan metodologi LCA dalam beberapa tahun terakhir (Fantke et yawsal., 2021). Dengan mengintegrasikan rekomendasi-rekomendasi tersebut ke dalam strategi pengelolaan lingkungan pabrik, potensi dampak toksisitas yang menjadi dampak utama dalam proses produksi sodium methylete ini dapat ditekan secara signifikan menuju operasi yang lebih berkelanjutan.

8.4. Kesimpulan Pembahasan

Berdasarkan hasil analisis LCA menggunakan metode ReCiPe 2016 Midpoint (H) pada proses produksi sodium methylete, dapat disimpulkan bahwa dampak lingkungan yang paling signifikan pada kedua tahap proses, baik reaksi maupun separasi didominasi oleh kategori toksisitas. *Marine ecotoxicity* mencatat nilai normalisasi tertinggi, diikuti oleh *freshwater ecotoxicity*, *human carcinogenic toxicity*, *human non-carcinogenic toxicity*, dan *terrestrial ecotoxicity*. Tingginya nilai pada kelima kategori tersebut secara konsisten di kedua tahap mengindikasikan bahwa sumber dampak utama berasal dari karakteristik bahan baku yang digunakan, yaitu methanol dan sodium hydroxide, serta rantai produksi keduanya di tingkat hulu. Sementara itu, kategori dampak lainnya seperti *global warming*, *fossil resource scarcity*, dan *eutrophication* menunjukkan nilai yang jauh lebih rendah dan tidak menjadi perhatian utama dalam proses ini. Oleh karena itu, upaya perbaikan kinerja lingkungan pabrik sodium methylete perlu diprioritaskan pada pengelolaan emisi toksik dan pemilihan bahan baku yang lebih ramah lingkungan.