

BAB VIII

LIFE CYCLE ASSESMENT

8.1 Pendahuluan

Life cycle assessment (LCA) merupakan pendekatan dalam pengukuran dampak suatu produk kepada ekosistem yang diterapkan dengan mengidentifikasi, menganalisis, serta menakar seberapa besarnya pemakaian energi, bahan baku, emisi dan faktor lainnya yang masih berhubungan dengan produk tersebut di sepanjang siklus hidupnya (Lestari, 2025). Dalam studi ini, pendekatan yang digunakan adalah *cradle-to-gate*, yaitu penilaian yang dibatasi mulai dari tahap penyediaan bahan baku hingga produk keluar dari pabrik (Senseney et al., 2023). Pendekatan ini umum digunakan dalam industri proses karena mampu merepresentasikan kinerja lingkungan pada tahap produksi secara fokus dan relevan.

Penerapan LCA pada pabrik isopropanol menjadi penting mengingat proses produksi melibatkan konsumsi energi yang signifikan, penggunaan bahan baku berbasis hidrokarbon, serta potensi emisi dan limbah dari berbagai unit operasi. Dengan adanya integrasi proses seperti reaksi dan pemisahan dalam satu sistem, diperlukan analisis yang mampu mengidentifikasi kontribusi tiap tahapan terhadap dampak lingkungan. Parameter seperti *Global Warming Potential*, konsumsi energi, serta potensi pencemaran menjadi indikator utama dalam mengevaluasi performa lingkungan dari proses yang dirancang (Maisarah & Dian, 2023).

Pelaksanaan LCA dalam studi ini mengacu pada standar internasional dari International Organization for Standardization, yaitu ISO 14040 dan ISO 14044, yang mencakup tahapan penentuan tujuan dan ruang lingkup, inventarisasi siklus hidup (LCI), penilaian dampak (LCIA), serta interpretasi hasil (Kementrian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, 2021). Untuk mendukung analisis, digunakan perangkat lunak openLCA yang memungkinkan pemodelan aliran massa dan energi serta perhitungan dampak lingkungan secara terstruktur dan terintegrasi

8.2 Goal and Scope Definition

8.2.1 Tujuan studi

Tujuan dari pelaksanaan *Life Cycle Assessment* (LCA) pada pabrik isopropanol ini adalah untuk mengevaluasi besarnya potensi dampak lingkungan yang dihasilkan selama proses produksi. Analisis ini dilakukan untuk mengidentifikasi kontribusi dari setiap tahapan proses terhadap indikator dampak lingkungan,

seperti *Global Warming Potential*, sehingga dapat diketahui bagian proses mana yang paling dominan memberikan beban lingkungan. Hasil dari studi ini diharapkan dapat menjadi dasar dalam pengembangan proses yang lebih efisien dan ramah lingkungan, khususnya pada sistem yang mengintegrasikan reaksi dan pemisahan.

8.2.2 Unit Fungsional

Functional unit yang digunakan dalam studi ini adalah 1 ton isopropanol (IPA) dengan kemurnian > 99,5%. Pemilihan *functional unit* ini bertujuan untuk memberikan basis perhitungan yang jelas dan konsisten, sehingga seluruh aliran massa dan energi dalam sistem dapat dibandingkan dalam satu acuan yang sama. Selain itu, spesifikasi kemurnian yang tinggi dipilih karena sesuai dengan kebutuhan produk di industri, sehingga hasil analisis lebih relevan secara praktis. Untuk lebih jelas, *Functional unit* dapat dilihat pada tabel 8.1 berikut

Tabel 8.1 *Functional Unit*

Parameter	Nilai
Produk	Isopropanol
Kemurnian	> 99,5%
Basis	1 Ton
Sistem	<i>Cradle-to-Gate</i>

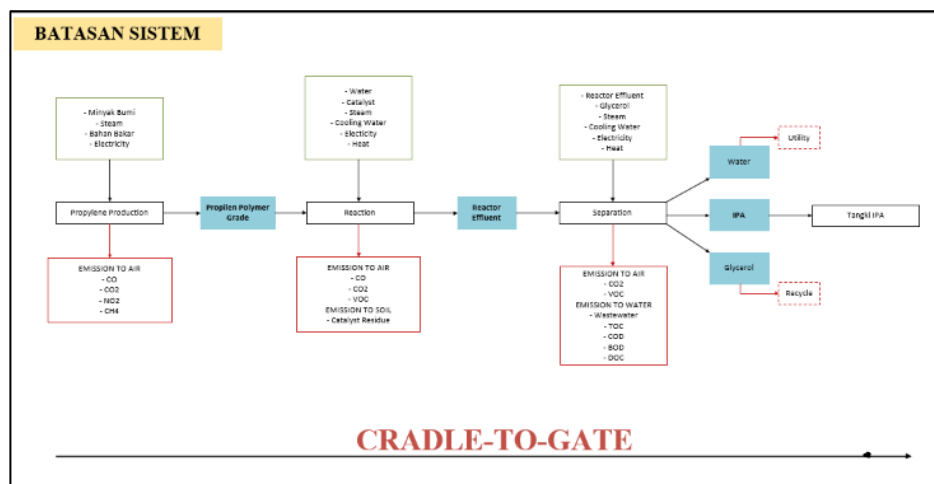
8.2.3 Batasan Sistem

Batasan sistem (*system boundary*) yang digunakan adalah pendekatan *cradle-to-gate*, yaitu mencakup seluruh tahapan mulai dari penyediaan bahan baku hingga produk keluar dari pabrik. Tahapan yang termasuk dalam batasan ini meliputi penyediaan bahan baku utama (propilen, air, dan gliserol), proses reaksi menggunakan *reactive distillation* dengan katalis zeolit, proses pemisahan menggunakan *extractive distillation*, serta proses pemulihan *entrainer* melalui *entrainer recovery* untuk mendukung sistem *recycle*. Selain itu, utilitas seperti penyediaan energi (*steam* dan listrik) juga dimasukkan karena berkontribusi signifikan terhadap dampak lingkungan.

Sementara itu, beberapa tahapan tidak dimasukkan ke dalam batas sistem, seperti konstruksi pabrik, produksi peralatan, distribusi produk, serta tahap penggunaan dan akhir siklus hidup produk. Pengecualian ini dilakukan karena fokus analisis adalah pada tahap produksi, serta keterbatasan data dan kontribusi

yang relatif kecil terhadap total dampak dalam batas *cradle-to-gate*. Dengan demikian, ruang lingkup yang digunakan tetap representatif tanpa membuat model menjadi terlalu kompleks.

Untuk memperjelas ruang lingkup analisis, digunakan diagram *system boundary* yang menggambarkan aliran *input* dan *output* dari sistem. *Input* utama meliputi bahan baku (propilen, air, dan gliserol) serta energi (*steam* dan listrik), sedangkan *output* terdiri dari produk utama berupa isopropanol dengan kemurnian tinggi, serta aliran samping seperti emisi dan limbah cair serta padat. Diagram ini juga menunjukkan adanya aliran *recycle*, khususnya pada gliserol, yang berperan dalam meningkatkan efisiensi proses dan mengurangi kebutuhan bahan baku baru. *System Boundary* dapat dilihat pada gambar 8.1 berikut.



Gambar 8.1 Batasan Sistem Pabrik Isopropanol

8.2.4 Metode Penilaian Dampak

Tiga metode LCIA digunakan secara komplementer. CML-IA Baseline berfungsi sebagai metode midpoint untuk mengkarakterisasi aliran inventaris terhadap mekanisme seperti pemanasan global, ekotoksitas, eutrofikasi, pengasaman, dan deplesi sumber daya. ReCiPe 2016 Endpoint (H) digunakan sebagai jembatan midpoint-ke-endpoint, menerjemahkan hasil menjadi indikator kerusakan pada kesehatan manusia (DALY), kualitas ekosistem, dan kelangkaan sumber daya. EPS 2015dx dipilih karena kemampuannya mengkonversi emisi dan konsumsi sumber daya menjadi indikator berorientasi kerusakan dengan penilaian moneter, menghasilkan YOLL (Years of Life Lost), COPD, kanker, dan indikator nutrisi dalam satuan PersonYr. Integrasi ketiga metode ini mengikuti kerangka

acuan studi LCA sebelumnya untuk memberikan pemahaman yang lebih komprehensif

8.3 Life Cycle Inventory

Inventaris siklus hidup dikonstruksi menggunakan openLCA versi 2.6.0 bersama dengan database Ecoinvent 3.0 APOS. OpenLCA dipilih karena kemampuannya dalam pemodelan sistem produk, perhitungan inventaris, penilaian dampak, analisis hasil, interpretasi, visualisasi, dan penyimpanan data. Database Ecoinvent berfungsi sebagai sumber dasar untuk menggambarkan proses material, energi, transportasi, dan pengolahan.

Data inventaris mencakup masukan material, masukan panas, masukan energi, produk keluaran, material keluaran, dan emisi elementer yang dilepaskan ke udara, air, dan tanah. Sistem produksi foreground dibangun sebagai skenario skala industri yang direkonstruksi akibat keterbatasan data inventaris skala industri untuk produksi IPA melalui hidrasi propilen di Indonesia. Tabel 8.2 berikut menyajikan data inventaris lengkap untuk unit fungsional 1.000 kg isopropanol.

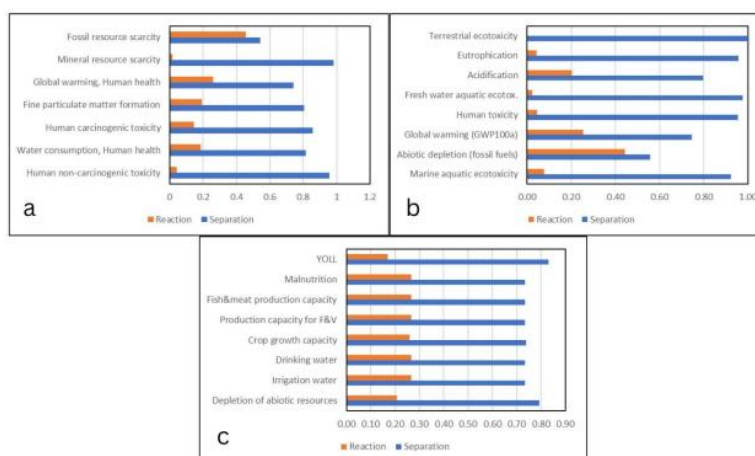
Tabel 8.2 Data Inventori

Kategori	Parameter	Satuan	Reaksi	Separasi
	Propilen	Kg	715,6775	-
	Air	m ³	0,626975	-
	HZSM-5	Kg	45,1183	-
<i>Input</i> material dan energi	Gliserol	Kg	-	713,63
	Air pendingin	m ³	5,01135	16,42
	<i>Heat (Steam)</i>	kWh	43,738	143,66
	Listrik	kWh	8,81	19,12
	Keluaran reaktor	Kg	-	1.327,05
Keluaran produk	Keluaran reaktor	Kg	1.327,05	-
	Isopropil alkohol	Kg	1000	-
Emisi	Residu katalis	Kg	-	45,1183
	VOC	Kg	15,6	-

Kategori	Parameter	Satuan	Reaksi	Separasi
	Air limbah	m ³		0,3639

8.4 Life Cycle Impact Assessment

Pada semua kategori dampak lingkungan yang dievaluasi dengan ketiga metode, tahap pemisahan secara konsisten menunjukkan nilai dampak yang lebih tinggi dibandingkan tahap reaksi, dengan kontribusi pemisahan berkisar antara 54,4% hingga 98,3% dari total dampak sistem. Gambar 8.2 menunjukkan perbandingan kontribusi kedua tahap tersebut.



Gambar 8.2 Kontribusi Proses Reaksi dan Pemisahan terhadap Dampak Lingkungan Berdasarkan: (a) ReCiPe 2016 Endpoint (H); (b) CML-IA Baseline; (c) EPS 2015dx

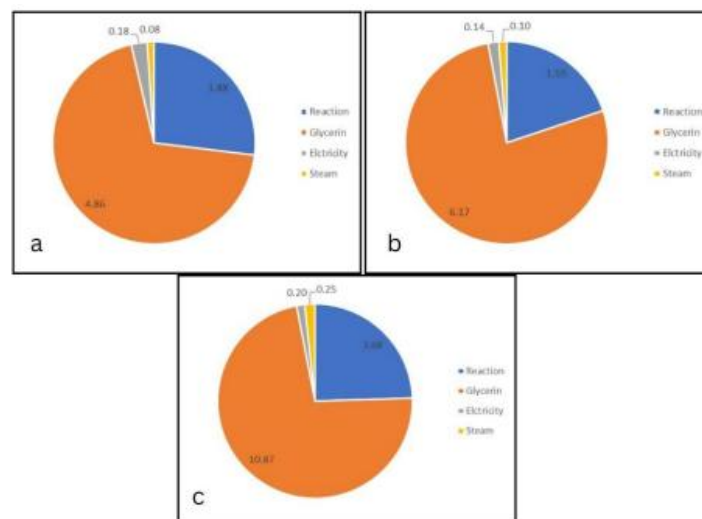
Berdasarkan metode ReCiPe 2016 Endpoint (H), dampak lingkungan absolut tertinggi tercatat dalam kategori kelangkaan sumber daya fosil, dengan total 962,23 USD₂₀₁₃ per 1.000 kg IPA. Tahap reaksi berkontribusi sebesar 438,83 USD₂₀₁₃ (45,6%) dan tahap pemisahan sebesar 523,40 USD₂₀₁₃ (54,4%). Tingginya dampak kelangkaan fosil pada tahap reaksi diprediksi berasal dari produksi propilen di hulu yang juga mendorong emisi GRK seperti CO₂ dan N₂O, sehingga turut meningkatkan dampak pemanasan global. Dalam kategori kelangkaan sumber daya mineral, tahap pemisahan mendominasi secara ekstrem pada 98,3%, menghasilkan 1,037 USD₂₀₁₃ dibandingkan hanya 0,018 USD₂₀₁₃ dari tahap reaksi.

Metode CML-IA Baseline menggunakan satuan yang lebih beragam, misalnya pemanasan global dalam kg CO₂ eq sehingga memungkinkan perbandingan dampak yang lebih detail. Ekotoksisitas terestrial mencatat dominasi pemisahan yang paling ekstrem, yaitu 99,95% dari total sistem. Dominasi serupa terlihat pada eutrofikasi (95,8%), ekotoksisitas akuatik laut (92,4%) yang merupakan kategori dengan dampak absolut

tertinggi dalam metode CML, serta ekotoksistasitas akuatik air tawar (97,7%). Dalam seluruh kategori CML, tahap pemisahan selalu menjadi penyumbang dominan, mengonfirmasi pola yang juga terlihat pada metode ReCiPe.

Metode EPS 2015dx mengkuantifikasi dampak dalam satuan berbasis massa (kg) terkait ketersediaan sumber daya alam dan kapasitas ekosistem. Kategori deplesi sumber daya abiotik mencatat dampak total tertinggi sebesar 1.585,97 kg per 1.000 kg IPA, dengan tahap pemisahan berkontribusi sebesar 79,2% dan reaksi 20,8%. Pola konsisten terlihat di seluruh kategori sumber daya alam dalam EPS, termasuk air, produksi ikan dan daging, serta produk pertanian.

Analisis kontribusi proses menunjukkan bahwa gliserin mendominasi dalam tahap pemisahan di semua kategori sumber daya, dengan pangsa 63,3% hingga 72,8%. Gliserin digunakan sebagai pelarut dalam distilasi ekstraktif pada tahap pemisahan, sehingga dampak lingkungan dari pengadaan dan penanganan gliserin menjadi penggerak utama sistem secara keseluruhan. Pada tahap reaksi, propilen menyumbang sekitar 98,8% hingga 100,5% dari dampak berbasis sumber daya, menegaskan peran sentralnya sebagai bahan baku intensif fosil. Gambar 8.3 memperlihatkan kontribusi gliserin secara lebih rinci di ketiga metode.



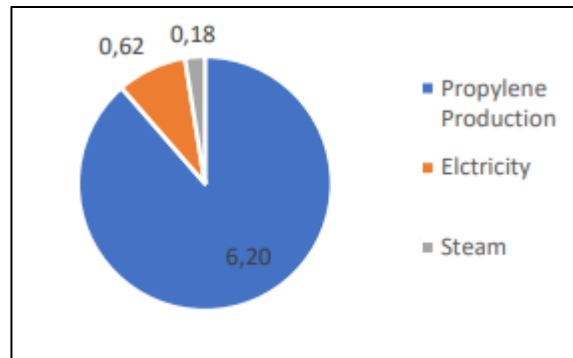
Gambar 8.3 Kontribusi gliserin dalam proses pemisahan terhadap dampak lingkungan: (a) ReCiPe 2016 Endpoint (H); (b) CML-IA Baseline; (c) EPS 2015dx

8.5 Interpretasi Hasil

8.5.1 Dampak Kesehatan Manusia

Dampak yang berkaitan dengan kesehatan manusia dievaluasi menggunakan metode ReCiPe 2016 Endpoint (H) dan EPS 2000, dengan verifikasi tambahan

melalui kategori toksisitas manusia CML-IA Baseline. Berdasarkan ReCiPe, dampak teratas dalam kategori dampak terkait kesehatan meliputi pemanasan global (kesehatan manusia), pembentukan partikel halus, toksisitas karsinogenik pada manusia, toksisitas non-karsinogenik pada manusia, dan konsumsi air (kesehatan manusia). Semua dampak ini dinyatakan dalam DALY. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2 di atas, tahap pemisahan mendominasi di seluruh kategori ReCiPe yang terkait dengan kesehatan. Kategori pemanasan global dan kesehatan manusia mencatat dampak total sebesar $4,11 \times 10^{-3}$ DALY, dengan tahap pemisahan berkontribusi sebesar 74,1% dan tahap reaksi sebesar 25,9%. Kategori pembentukan partikel halus mencatat kontribusi pemisahan hingga 80,7%. Kategori toksisitas non-karsinogenik pada manusia dan toksisitas karsinogenik pada manusia menunjukkan dominasi tahap pemisahan yang lebih menonjol, dengan kontribusi pemisahan masing-masing sebesar 95,8% dan 85,6% dari total. Dampak terkait kesehatan manusia dievaluasi menggunakan metode ReCiPe 2016 Endpoint (H) dan EPS 2000, dengan verifikasi tambahan melalui kategori toksisitas manusia CML-IA Baseline. Berdasarkan ReCiPe, dampak teratas dalam kategori dampak terkait kesehatan meliputi pemanasan global (kesehatan manusia), pembentukan partikel halus, toksisitas karsinogenik pada manusia, toksisitas non-karsinogenik pada manusia, dan konsumsi air (kesehatan manusia). Dampak ini dinyatakan dalam DALY. Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 8.4 di atas, tahap pemisahan mendominasi di seluruh kategori ReCiPe yang berkaitan dengan kesehatan. Kategori pemanasan global dan kesehatan manusia mencatat dampak total sebesar $4,11 \times 10^{-3}$ DALY, dengan tahap pemisahan menyumbang 74,1% dan tahap reaksi sebesar 25,9%. Kategori pembentukan partikel halus menyumbang pemisahan hingga 80,7%. Kategori toksisitas non-karsinogenik pada manusia dan toksisitas karsinogenik pada manusia menunjukkan dominasi pemisahan yang lebih menonjol, dengan pemisahan menyumbang 95,8% dan 85,6% dari total, masing-masing.



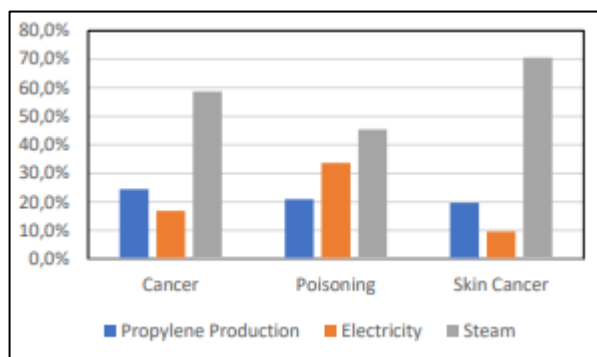
Gambar 8.4 Kontribusi produksi propilen terhadap dampak kesehatan manusia berdasarkan ReCiPe 2016 Endpoint (H)

Gambar 8.4 menunjukkan kontribusi setiap komponen proses pada tahap reaksi terhadap kategori dampak kesehatan berdasarkan metode ReCiPe. Propilena menjadi kontributor utama pada kategori yang berkaitan erat dengan pembakaran dan penggunaan bahan bakar fosil, termasuk pemanasan global, dampak kesehatan manusia (97,4%), dan toksisitas karsinogenik terhadap manusia (91,7%). Namun, pola yang berbeda terlihat pada kategori yang sensitif terhadap produk hasil pembakaran. Pada kategori toksisitas nonkarsinogenik terhadap manusia, kontribusi propilena hanya sebesar 65,9%, sedangkan listrik dan uap masing masing menyumbang 25,7% dan 8,5%. Hasil ini menunjukkan bahwa emisi yang berasal dari utilitas, terutama pembangkitan listrik dan penyediaan uap, memberikan kontribusi yang signifikan terhadap dampak toksisitas nonkarsinogenik.

Beban lingkungan tersebut terutama dipengaruhi oleh emisi logam berat, partikulat halus PM_{2.5}, sulfur dioksida (SO₂), dan nitrogen oksida (NO_x) yang dihasilkan selama tahap reaksi. Polutan tersebut dapat menimbulkan risiko serius terhadap kesehatan manusia dan kualitas lingkungan (Sun et al., 2024). Pada kategori pembentukan partikulat halus, propilena memberikan kontribusi terbesar yaitu 75,3%, diikuti oleh listrik sebesar 22,9% dan uap sebesar 1,9%.

Temuan ini juga didukung oleh analisis EPS 2000 berbasis Person Year yang menunjukkan pengaruh utilitas yang lebih dominan pada tahap reaksi. Pada kategori penyakit paru obstruktif kronis berat atau COPD severe, kontribusi listrik mencapai 50,7% sehingga melampaui propilena yang hanya berkontribusi sebesar 47,4%. Sementara itu, pada kategori kanker, keracunan, dan kanker kulit, uap memberikan kontribusi masing masing sebesar 58,7%, 45,4%, dan 70,6%. Nilai tersebut merupakan kontribusi uap tertinggi yang ditemukan dalam penelitian ini.

Hasil analisis EPS 2015dx untuk produksi isopropanol melalui metode hidrasi langsung, khususnya pada tahap reaksi, menunjukkan bahwa emisi hasil pembakaran dari proses pembangkitan uap merupakan sumber utama dampak karsinogenik dan toksik. Emisi tersebut terutama berasal dari senyawa hidrokarbon aromatik polisiklik (PAHs) dan senyawa organik volatil (VOCs) yang dihasilkan selama proses pembakaran, sehingga menjadi penyumbang utama beban toksisitas pada tahap reaksi.



Gambar 8.5 Kontribusi utilitas terhadap dampak kesehatan manusia berdasarkan EPS 2015dx

Gambar diatas menunjukkan kontribusi setiap komponen proses pada tahap pemisahan terhadap kategori dampak kesehatan berdasarkan metode ReCiPe. Gliserin secara konsisten menjadi kontributor utama pada seluruh kategori dampak kesehatan dalam tahap pemisahan. Pada kategori toksisitas nonkarsinogenik terhadap manusia, gliserin menyumbang 91,9% dari total dampak tahap pemisahan, diikuti oleh reaksi hulu sebesar 4,4%. Pada kategori toksisitas karsinogenik terhadap manusia, kontribusi gliserin mencapai 79,8%, sedangkan reaksi hulu memberikan kontribusi sebesar 16,8%.

Pada kategori kesehatan manusia akibat pemanasan global, gliserin berkontribusi sebesar 62,5% dalam tahap pemisahan, sementara reaksi hulu menyumbang 34,9%. Pada kategori pembentukan partikulat halus, gliserin dan listrik masing masing memberikan kontribusi sebesar 62,7% dan 11,9%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa gliserin merupakan sumber utama dampak kesehatan pada sebagian besar kategori yang dianalisis dalam tahap pemisahan.

Analisis EPS 2000 berbasis Person Year memberikan gambaran yang lebih rinci mengenai dampak kesehatan tertentu, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 6 dan 8. Kategori YOLL (*Years of Lost Life*) mencatat dampak kesehatan tertinggi, dengan tahap pemisahan memberikan kontribusi sebesar $7,80 \times 10^{-3}$ Person Year atau 83,0%

dari total dampak. Di dalam tahap pemisahan, gliserin menjadi kontributor terbesar terhadap kategori YOLL dengan kontribusi sebesar 60,4%, diikuti oleh reaksi hulu sebesar 20,3% dan listrik sebesar 18,1%.

Analisis proses pada tahap pemisahan menunjukkan bahwa gliserin menyumbang 91,8% terhadap dampak toksisitas manusia berdasarkan indikator CML. Temuan ini konsisten dengan hasil yang diperoleh dari metode ReCiPe dan EPS. Oleh karena itu, hasil penelitian ini mengindikasikan bahwa emisi partikulat yang berasal dari proses pengolahan gliserin serta konsumsi listrik pada tahap pemisahan secara bersama sama menjadi penyebab utama beban gangguan kesehatan pernapasan.

8.5.2 Peluang Perbaikan dan Rekomendasi Mitigasi

Gambar 8.3 menegaskan bahwa tahap pemisahan mendominasi tiga kategori dampak lingkungan yang paling signifikan, yaitu lebih dari 73% untuk seluruh kategori yang dibandingkan dan lebih dari 90% untuk kategori toksisitas serta eutrofikasi. Temuan ini menunjukkan bahwa gliserin merupakan target utama dalam upaya perbaikan proses. Oleh karena itu, pemanfaatan gliserin menjadi produk bernilai tambah, seperti bahan baku industri kimia atau energi, dapat menjadi alternatif untuk mengurangi kebutuhan pengolahan limbah yang intensif energi. Selain itu, intensifikasi proses pemurnian gliserin, misalnya melalui pemisahan membran atau distilasi reaktif, berpotensi menurunkan konsumsi utilitas sehingga secara langsung mengurangi dampak ekotoksikitas perairan, ekotoksikitas daratan, dan eutrofikasi berdasarkan metode CML.

Pada tahap reaksi, kontribusi propilena yang mencapai 99,5% terhadap kategori kelangkaan bahan bakar fosil berdasarkan ReCiPe dan 97,4% terhadap kategori kesehatan manusia akibat pemanasan global menunjukkan bahwa penggantian sebagian propilena dengan bahan baku yang berasal dari sumber terbarukan dapat memberikan manfaat lingkungan yang signifikan (Shirzad & Kantor, 2025). Untuk konsumsi listrik dan uap, kontribusinya terhadap kategori COPD berat masing masing mencapai 50,7% dan terhadap kategori kanker mencapai 58,7%, sedangkan pada kategori kesehatan manusia kontribusinya mencapai 70,6%. Kondisi ini menegaskan perlunya dekarbonisasi utilitas. Penggunaan listrik terbarukan dan sistem pembangkitan uap rendah karbon dapat mengurangi beban karsinogenik dan gangguan kesehatan pernapasan yang saat ini berasal dari sektor utilitas. Intervensi tersebut secara konsisten menargetkan titik kritis yang teridentifikasi pada ketiga

metode penilaian, sehingga dapat menjadi peta jalan prioritas untuk meningkatkan keberlanjutan produksi isopropanol melalui proses hidrasi langsung.

8.6 Kesimpulan

Penelitian ini melakukan analisis Life Cycle Assessment (LCA) secara komprehensif terhadap produksi isopropil alkohol (IPA) melalui proses hidrasi langsung propilena dengan menerapkan metode penilaian dampak pada tiga tingkat analisis yang berbeda, yaitu ReCiPe 2016 Endpoint (H), CML 2002, dan EPS 2000. Ketiga metode tersebut digunakan untuk mengevaluasi dampak lingkungan dan kesehatan manusia pada setiap tahapan proses produksi. Hasil analisis menunjukkan bahwa tahap pemisahan secara konsisten memberikan kontribusi terbesar terhadap total dampak sistem pada seluruh metode yang digunakan, dengan gliserin teridentifikasi sebagai titik kritis utama pada tingkat proses di dalam tahap tersebut.

Selain itu, pada tahap reaksi, propilena berperan sebagai kontributor dominan terhadap kategori dampak yang berkaitan dengan penggunaan sumber daya dan perubahan iklim, sedangkan konsumsi utilitas menjadi faktor utama yang memengaruhi dampak terhadap kesehatan manusia. Berdasarkan temuan titik kritis tersebut, direkomendasikan dua strategi perbaikan utama. Pertama, meningkatkan pemanfaatan atau valorisasi gliserin sehingga dapat memberikan nilai tambah sekaligus mengurangi beban lingkungan. Kedua, melakukan dekarbonisasi utilitas melalui penggunaan energi berkelanjutan dan sistem pembangkitan uap rendah karbon.

Untuk penelitian selanjutnya, disarankan agar batas sistem diperluas dengan memasukkan proses produksi propilena secara aktual, implementasi integrasi energi serta memaksimalkan valorisasi gliserin. Selain itu, analisis ketidakpastian menggunakan metode Monte Carlo perlu diterapkan untuk menguji sensitivitas peringkat titik kritis terhadap variasi data inventori. Penerapan metode LCA lainnya juga dapat dilakukan untuk memperkuat temuan penelitian ini serta memberikan gambaran yang lebih luas mengenai keberlanjutan produksi pelarut di masa mendatang.