

BAB VIII

LCA

8.1 Pendahuluan

Perkembangan industri petrokimia di Indonesia terus mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya kebutuhan bahan baku plastik untuk berbagai sektor industri. Salah satu produk petrokimia yang memiliki peranan penting adalah *High Density Polyethylene* (HDPE). HDPE merupakan polimer termoplastik yang banyak digunakan sebagai bahan baku dalam pembuatan pipa, botol, kemasan, kontainer, serta berbagai produk kebutuhan rumah tangga dan industri. Tingginya kebutuhan HDPE menjadikan perancangan pabrik HDPE sebagai salah satu upaya yang strategis untuk mendukung ketersediaan bahan baku industri plastik di dalam negeri.

Dalam perancangan suatu pabrik kimia, umumnya aspek yang menjadi fokus utama adalah kelayakan teknis, ekonomi, dan keselamatan proses. Namun, seiring meningkatnya perhatian terhadap isu lingkungan dan pembangunan berkelanjutan, aspek lingkungan juga menjadi bagian penting yang perlu dikaji. Hal ini disebabkan karena proses produksi HDPE melibatkan penggunaan bahan baku berbasis hidrokarbon, kebutuhan energi utilitas yang cukup besar, serta potensi emisi yang dihasilkan selama proses berlangsung. Jika tidak dianalisis secara menyeluruh, aktivitas tersebut dapat memberikan dampak terhadap lingkungan.

Salah satu metode yang dapat digunakan untuk mengevaluasi potensi dampak lingkungan dari suatu proses industri adalah *Life Cycle Assessment* (LCA) atau Penilaian Daur Hidup. LCA merupakan metode yang digunakan untuk mengidentifikasi, mengkuantifikasi, dan mengevaluasi potensi dampak lingkungan dari suatu produk atau proses sepanjang daur hidupnya. Berdasarkan SNI ISO 14040:2016 dan SNI ISO 14044:2017, LCA didefinisikan sebagai kompilasi dan evaluasi terhadap masukan, keluaran, serta potensi dampak lingkungan dari suatu sistem produk sepanjang daur hidupnya, mulai dari pengadaan bahan baku, proses produksi, distribusi, penggunaan, hingga tahap akhir siklus hidup produk sesuai dengan batas sistem yang telah ditentukan (KLHK, 2021).

Menurut Saidah dkk. (2010), LCA merupakan alat analisis yang mampu memberikan gambaran secara menyeluruh mengenai penggunaan sumber daya, konsumsi

energi, dan pelepasan emisi ke lingkungan dari suatu produk atau proses, sehingga dapat digunakan untuk menilai dampak lingkungan pada setiap tahapan proses yang berlangsung. Melalui metode ini, unit proses yang memberikan kontribusi dampak terbesar terhadap lingkungan dapat diidentifikasi, sehingga memudahkan dalam menentukan upaya perbaikan proses.

Pada perancangan pabrik HDPE, kajian LCA dilakukan untuk mengevaluasi dampak lingkungan dari setiap tahapan proses produksi, mulai dari unit reaksi, unit separasi serta *physical and handling unit*. Kajian ini bertujuan untuk mengetahui kategori dampak lingkungan yang dominan pada masing-masing unit proses, seperti *global warming potential, acidification, eutrophication, dan photochemical oxidation*.

Dengan dilakukannya kajian LCA, diharapkan rancangan pabrik HDPE yang dihasilkan tidak hanya memenuhi aspek teknis dan ekonomis, tetapi juga memiliki kinerja lingkungan yang baik serta mendukung prinsip green industry dan sustainable process design.

8.2 Tujuan dan Lingkup

8.2.1 Tujuan Kajian

Kajian *Life Cycle Assessment* (LCA) pada perancangan pabrik *High Density Polyethylene* (HDPE) ini bertujuan untuk mengevaluasi potensi dampak lingkungan yang dihasilkan dari keseluruhan proses produksi. Melalui kajian ini, dapat diketahui besarnya kontribusi masing-masing unit proses terhadap kategori dampak lingkungan yang dianalisis. Selain itu, tujuan kajian ini adalah untuk mengidentifikasi unit proses yang memberikan kontribusi dampak terbesar atau *environmental hotspot*, sehingga dapat dijadikan dasar dalam evaluasi dan perbaikan rancangan proses. Hasil kajian LCA diharapkan mampu mendukung pengambilan keputusan dalam perancangan pabrik yang tidak hanya layak secara teknis dan ekonomis, tetapi juga memiliki kinerja lingkungan yang lebih baik dan berkelanjutan.

8.2.2 Lingkup LCA

Lingkup kajian LCA pada perancangan pabrik HDPE ini menggunakan pendekatan *cradle-to-gate*, yaitu dimulai dari tahap pengadaan bahan baku hingga

produk HDPE keluar dari pabrik dan siap untuk didistribusikan. Tahap penggunaan produk oleh konsumen serta tahap akhir daur hidup produk tidak termasuk dalam batas kajian ini. Unit fungsi (*functional unit*) yang digunakan adalah 1 kg produk HDPE, sehingga seluruh data inventori dan hasil penilaian dampak lingkungan dinyatakan berdasarkan satuan tersebut. Adapun unit proses yang termasuk dalam lingkup kajian meliputi *unit reaksi*, *unit separasi* serta *physical and handling unit*. Data yang digunakan dalam kajian ini diperoleh dari hasil perhitungan neraca massa, neraca energi, dan data utilitas yang telah disusun pada bab sebelumnya.

8.3 Metode Pelaksanaan LCA

8.3.1 Standar atau Referensi yang Dirujuk

Pelaksanaan kajian *Life Cycle Assessment* (LCA) pada perancangan pabrik HDPE ini mengacu pada standar SNI ISO 14040:2016 tentang *Environmental Management – Life Cycle Assessment – Principles and Framework* dan SNI ISO 14044:2017 tentang *Environmental Management – Life Cycle Assessment – Requirements and Guidelines*. Standar tersebut digunakan sebagai acuan utama dalam penentuan tujuan dan lingkup, penyusunan inventori daur hidup (*Life Cycle Inventory/LCI*), penilaian dampak daur hidup (*Life Cycle Impact Assessment/LCIA*), serta interpretasi hasil kajian. Selain itu, pedoman penyusunan laporan juga merujuk pada Pedoman Penyusunan Laporan Penilaian Daur Hidup (LCA) oleh KLHK Tahun 2021 sebagai referensi teknis dalam penyajian hasil kajian.

8.3.2 Metode Perhitungan yang Digunakan

Metode perhitungan dalam kajian LCA dilakukan berdasarkan data inventori yang diperoleh dari hasil neraca massa, neraca energi, dan utilitas proses pada bab sebelumnya. Seluruh data input dan output proses dinyatakan dalam satuan per 1 kg produk HDPE sesuai dengan unit fungsi yang telah ditetapkan. Data inventori yang digunakan meliputi bahan baku utama, bahan pendukung, konsumsi energi listrik, kebutuhan *steam*, penggunaan air pendingin, serta emisi atau keluaran proses. Selanjutnya, data tersebut dimasukkan ke dalam perangkat lunak openLCA versi 2.6.0 untuk dilakukan proses karakterisasi dampak lingkungan. Perhitungan dampak dilakukan dengan mengalikan besarnya aliran inventori dengan faktor karakterisasi

masing-masing kategori dampak sesuai metode yang dipilih, sehingga diperoleh nilai potensi dampak lingkungan untuk setiap unit proses.

8.3.3 Pemilihan Metode dan Penilaian Dampak

Metode penilaian dampak dalam penelitian ini menggunakan dua metode Life Cycle Impact Assessment (LCIA), yaitu CML-IA baseline dan ILCD 2011 Midpoint+ yang tersedia pada perangkat lunak openLCA. Penggunaan dua metode ini bertujuan untuk melakukan analisis komparatif terhadap hasil karakterisasi dampak lingkungan dan kesehatan pada sistem produksi HDPE. Metode CML-IA baseline dipilih karena merupakan metode yang banyak digunakan dalam studi LCA pada sektor industri kimia dan petrokimia, serta mampu mengevaluasi kategori dampak lingkungan pada tingkat midpoint, seperti *abiotic depletion*, *acidification*, *eutrophication*, *global warming potential*, *human toxicity*, dan *ecotoxicity*. Sementara itu, metode ILCD 2011 Midpoint+ digunakan untuk memberikan evaluasi yang lebih rinci terhadap kategori dampak, khususnya yang berkaitan dengan kesehatan manusia, seperti *human toxicity cancer effects* dan *human toxicity non-cancer effects*. Perbandingan kedua metode ini dilakukan untuk mengidentifikasi perbedaan hasil penilaian dampak serta menentukan unit proses yang memberikan kontribusi dampak terbesar berdasarkan masing-masing metode.

8.4 Inventori Dampak Hidup

8.4.1 Deskripsi Kualitatis Unit Proses

Unit proses yang dianalisis pada kajian LCA pabrik HDPE meliputi seluruh tahapan utama dalam proses produksi, yaitu *unit reaksi*, *unit separasi serta physical and handling unit*. Tahap *prepolymerization* merupakan tahap awal pembentukan polimer awal (*prepolymer*) melalui reaksi monomer dengan bantuan katalis. Selanjutnya, tahap *polymerization* merupakan proses utama pembentukan rantai polimer HDPE. Tahap *degassing* berfungsi untuk menghilangkan sisa monomer atau senyawa volatil yang masih terkandung dalam produk. Pada tahap *additive and pelletizing*, produk HDPE dicampur dengan bahan aditif kemudian dibentuk menjadi *pellet*. Tahap akhir meliputi *bagging* untuk pengemasan produk dan transportasi menuju distribusi.

8.4.2 Proses Pengumpulan Data

Data inventori yang digunakan dalam kajian ini diperoleh dari hasil perhitungan neraca massa, neraca energi, dan utilitas proses yang telah disusun pada bab sebelumnya. Data primer meliputi kebutuhan bahan baku, bahan pendukung, energi listrik, *steam*, air pendingin, serta jumlah produk dan emisi yang dihasilkan dari masing-masing unit proses. Selain data hasil perancangan, digunakan pula data sekunder berupa faktor emisi, data karakterisasi bahan, serta basis data proses yang tersedia pada perangkat lunak openLCA untuk mendukung penyusunan inventori secara komprehensif.

8.4.3 Sumber Literatur

Sumber literatur yang digunakan dalam penyusunan inventori meliputi standar SNI ISO 14040:2016, SNI ISO 14044:2017, pedoman penyusunan laporan LCA oleh KLHK (2021), serta database bawaan pada perangkat lunak openLCA yang digunakan sebagai referensi data sekunder. Selain itu, beberapa data pendukung diperoleh dari jurnal ilmiah dan referensi literatur yang berkaitan dengan konsumsi energi, faktor emisi, serta karakteristik proses produksi HDPE untuk memastikan kesesuaian data inventori dengan kondisi proses yang dianalisis.

8.4.4 Prosedur Perhitungan Data

Perhitungan data inventori dilakukan dengan mengonversi seluruh data input dan output proses ke dalam satuan per 1 kg produk HDPE sesuai unit fungsi yang telah ditetapkan. Setiap aliran massa dan energi dihitung berdasarkan hasil neraca massa dan neraca energi, kemudian dinormalisasi terhadap unit fungsi. Data emisi dan penggunaan utilitas selanjutnya dimasukkan ke dalam perangkat lunak openLCA untuk dilakukan karakterisasi dampak lingkungan.

8.4.5 Inventori Data

Inventori data yang digunakan dalam kajian LCA disusun dalam bentuk data input dan output untuk setiap unit proses. Data yang dicantumkan meliputi bahan baku, bahan tambahan, energi utilitas, produk, dan emisi proses. Contoh inventori data pada *unit reaction* disajikan pada Tabel 8.1.

Tabel 8.1 Inventori Data

Input			
<i>Flow</i>	<i>Category</i>	<i>Amount</i>	<i>Unit</i>
<i>Butene</i>	<i>Manufacturing</i>	6,1	Kg
<i>Electricity</i>	<i>Electricity</i>	350	kWH
<i>Ethylene</i>	<i>Manufacturing</i>	1020	Kg
<i>Hexane</i>	<i>Manufacturing</i>	24,6	Kg
<i>Hydrogen</i>	<i>Manufacturing</i>	1,8	Kg
<i>Nitrogen</i>	<i>Manufacturing</i>	1748	Kg
<i>Output</i>			<i>Unit</i>
<i>Flow</i>	<i>Category</i>	<i>Amount</i>	<i>Unit</i>
<i>Rection Unit</i>		1000	Kg
<i>Fines</i>	<i>HDPE Production</i>	3	Kg
<i>Polymer powder</i>	<i>HDPE Production</i>	1004	Kg
<i>Hexane</i>	<i>Emission to air</i>	24	Kg
<i>Hydrocarbon</i>	<i>Emission to air</i>	20	Kg
<i>Nitrogen</i>	<i>Emission to air</i>	1746	Kg

8.4.6 Validasi Data

Validasi data dilakukan dengan membandingkan hasil inventori terhadap hasil perhitungan neraca massa dan energi pada bab sebelumnya, serta pengecekan konsistensi satuan dan kesesuaian nilai terhadap basis unit fungsi. Selain itu, validasi juga dilakukan melalui pengecekan kesesuaian data input pada perangkat openLCA

dengan data inventori yang telah disusun, sehingga hasil penilaian dampak diperoleh secara akurat.

8.5 Penilaian Dampak Daur Hidup

8.5.1 Prosedur Penilaian Dampak Daur Hidup

Tahap penilaian dampak daur hidup (*Life Cycle Impact Assessment/LCIA*) merupakan lanjutan dari tahap inventori daur hidup (*Life Cycle Inventory/LCI*) yang telah disusun pada subbab sebelumnya. Pada tahap ini, seluruh data inventori yang meliputi bahan baku, bahan tambahan, energi, utilitas, emisi, serta aliran massa antar unit proses dimasukkan ke dalam perangkat lunak openLCA versi 2.6.0 untuk dilakukan evaluasi dampak lingkungan dan kesehatan.

Dalam penelitian ini digunakan dua metode penilaian dampak, yaitu *CML-IA baseline* dan *ILCD 2011 Midpoint+*. Penggunaan kedua metode ini bertujuan untuk melakukan analisis perbandingan hasil dampak yang dihasilkan dari sistem produksi HDPE. Metode *CML-IA baseline* digunakan untuk mengevaluasi kategori dampak lingkungan pada tingkat midpoint yang umum diterapkan pada studi industri kimia dan petrokimia, seperti *global warming potential*, *acidification*, *eutrophication*, *photochemical oxidation*, dan *ecotoxicity*. Sementara itu, metode *ILCD 2011 Midpoint+* digunakan untuk memberikan evaluasi yang lebih rinci terhadap kategori dampak, khususnya yang berkaitan dengan kesehatan manusia, seperti *human toxicity cancer effects* dan *human toxicity non-cancer effects*, serta kategori dampak lingkungan lainnya.

Tahapan analisis dimulai dari proses *classification*, yaitu pengelompokan setiap aliran inventori ke dalam kategori dampak yang relevan sesuai dengan masing-masing metode. Sebagai contoh, emisi senyawa volatil seperti *hexane* dan *dichloroethylene* dikelompokkan ke dalam kategori *photochemical oxidation* atau *photochemical ozone formation*. Selanjutnya dilakukan tahap *characterization*, yaitu perhitungan besarnya kontribusi masing-masing aliran inventori menggunakan faktor karakterisasi yang tersedia pada kedua metode tersebut. Melalui tahapan ini, setiap unit proses dalam produksi HDPE dapat dievaluasi kontribusinya terhadap berbagai kategori dampak, sehingga dapat diketahui tahapan proses yang memberikan kontribusi dampak terbesar

serta dilakukan perbandingan hasil antar metode untuk menilai sensitivitas pemilihan metode LCIA.

8.5.2 Kategori Dampak, Indikator Dampak, dan Hasil Penilaian Daur Hidup

8.5.2.1 Metode CML-IA baseline

Berdasarkan hasil analisis LCIA menggunakan metode *CML-IA baseline* pada unit reaksi, kategori dampak dengan nilai tertinggi adalah *marine aquatic ecotoxicity* sebesar $5,24082 \times 10^{-9}$, diikuti oleh *photochemical oxidation* sebesar $3,24785 \times 10^{-10}$ dan *abiotic depletion (fossil fuels)* sebesar $1,85101 \times 10^{-10}$. Hasil ini menunjukkan bahwa unit reaksi memiliki kontribusi signifikan terhadap potensi toksisitas lingkungan perairan serta penggunaan sumber daya fosil. Analisis contribution tree pada kategori abiotic depletion menunjukkan bahwa kontribusi terbesar berasal dari *market for nitrogen, liquid* sebesar 75,92%, diikuti oleh proses *molecular sieve separation* sebesar 14,89% dan penggunaan energi listrik sebesar 6,45%. Hal ini mengindikasikan bahwa penggunaan nitrogen cair sebagai utilitas pada unit reaksi merupakan faktor dominan yang memengaruhi dampak deplesi sumber daya abiotik.

Tabel 8.2 Hasil Analisa Reaction Unit Metode CML-IA Baseline

Kategori dampak	Nilai normalisasi
<i>Marine aquatic ecotoxicity</i>	5.24082E-9
<i>Photochemical oxidation</i>	3.24785E-10
<i>Abiotic depletion (fossil fuels)</i>	1.85101E-10
<i>Fresh water aquatic ecotoxicity</i>	1.53916E-10
<i>Human toxicity</i>	1.25516E-10
<i>Global warming (GWP100a)</i>	4.90194E-11
<i>Acidification</i>	2.67093E-11
<i>Eutrophication</i>	1.32269E-11
<i>Abiotic depletion</i>	6.97324E-12
<i>Terrestrial ecotoxicity</i>	1.39797E-12
<i>Ozone layer depletion (ODP)</i>	2.38598E-13

Berdasarkan hasil analisis LCIA menggunakan metode *CML-IA baseline*, unit separasi menunjukkan nilai dampak tertinggi pada kategori *marine aquatic*

ecotoxicity sebesar $5,49731 \times 10^{-9}$, diikuti oleh *human toxicity* sebesar $2,80735 \times 10^{-10}$ dan *fresh water aquatic ecotoxicity* sebesar $2,10944 \times 10^{-10}$. Hasil ini menunjukkan bahwa unit separasi memberikan kontribusi yang cukup signifikan terhadap potensi toksisitas lingkungan, khususnya pada media perairan. Berdasarkan analisis *contribution tree* pada kategori *abiotic depletion*, kontribusi terbesar berasal dari proses *polyethylene production, high density, granulate* sebesar 99,80%, sedangkan kontribusi dari *compressed air production* dan *electricity production* masing-masing hanya sebesar 0,18% dan 0,02%. Hal ini menunjukkan bahwa dampak pada unit separasi lebih banyak dipengaruhi oleh proses hulu (*upstream process*) dari produksi HDPE dibandingkan utilitas proses secara langsung.

Tabel 8.3 Hasil Analisa *Separation Unit Metode CML-IA Baseline*

Kategori dampak	Nilai
<i>Marine aquatic ecotoxicity</i>	5.49731E-9
<i>Human toxicity</i>	2.80735E-10
<i>Fresh water aquatic ecotoxicity</i>	2.10944E-10
<i>Abiotic depletion (fossil fuels)</i>	1.74284E-10
<i>Abiotic depletion</i>	6.07304E-11
<i>Global warming (GWP100a)</i>	4.47653E-11
<i>Acidification</i>	2.44733E-11
<i>Photochemical oxidation</i>	1.61583E-11
<i>Eutrophication</i>	8.70637E-12
<i>Terrestrial ecotoxicity</i>	1.19483E-12
<i>Ozone layer depletion</i>	1.80306E-13

Berdasarkan hasil analisis LCIA menggunakan metode *CML-IA baseline*, *Physical Handling Unit* menunjukkan nilai dampak tertinggi pada kategori *marine aquatic ecotoxicity* sebesar $5,72122 \times 10^{-9}$, diikuti oleh *human toxicity* sebesar $2,85063 \times 10^{-10}$ dan *fresh water aquatic ecotoxicity* sebesar $2,17376 \times 10^{-10}$. Nilai ini menunjukkan bahwa unit penanganan fisik memberikan kontribusi signifikan terhadap potensi toksisitas lingkungan, khususnya pada media perairan. Hasil analisis *contribution tree* pada kategori *abiotic depletion* menunjukkan bahwa kontribusi terbesar berasal dari proses *polyethylene*

production, high density sebesar 99,74%, sedangkan kontribusi dari penggunaan energi listrik hanya sebesar 0,26%. Hal ini menunjukkan bahwa dampak lingkungan pada unit ini didominasi oleh proses hulu (*upstream process*) dari produksi HDPE, sementara aktivitas penanganan fisik secara langsung memberikan kontribusi yang relatif kecil.

Tabel 8.4 Hasil Analisa *Physical and Handling Unit Metode CML-IA Baseline*

Kategori dampak	Nilai
<i>Marine aquatic ecotoxicity</i>	5.72122E-9
<i>Human toxicity</i>	2.85063E-10
<i>Fresh water aquatic ecotoxicity</i>	2.17376E-10
<i>Abiotic depletion (fossil fuels)</i>	1.76144E-10
<i>Abiotic depletion</i>	6.07662E-11
<i>Global warming (GWP100a)</i>	4.59462E-11
<i>Acidification</i>	2.50153E-11
<i>Photochemical oxidation</i>	1.63244E-11
<i>Eutrophication</i>	9.26762E-12
<i>Terrestrial ecotoxicity</i>	1.22715E-12
<i>Ozone layer depletion (ODP)</i>	2.00004E-13

Berdasarkan hasil analisis LCIA menggunakan *metode CML-IA baseline*, ketiga unit proses pada sistem produksi HDPE menunjukkan pola dampak yang relatif serupa, dengan kategori *marine aquatic ecotoxicity* sebagai dampak tertinggi pada seluruh unit. Nilai tertinggi diperoleh pada *Physical Handling Unit* sebesar $5,72122 \times 10^{-9}$, diikuti oleh *Separation Unit* sebesar $5,49731 \times 10^{-9}$, dan *Reaction Unit* sebesar $5,24082 \times 10^{-9}$. Hasil ini menunjukkan bahwa *Physical Handling Unit* merupakan unit proses dengan kontribusi dampak lingkungan terbesar. Analisis kontribusi juga menunjukkan bahwa sebagian besar dampak pada *Physical Handling Unit* dan *Separation Unit* berasal dari proses hulu (*upstream process*) yaitu *polyethylene production*, dengan kontribusi masing-masing sebesar 99,74% dan 99,80%. Sementara itu, pada *Reaction Unit*, kontribusi terbesar berasal dari penggunaan nitrogen cair sebagai *utilitas* proses. Secara keseluruhan, dapat disimpulkan bahwa dampak lingkungan sistem

produksi HDPE lebih dominan dipengaruhi oleh proses hulu dibandingkan aktivitas operasi unit proses secara langsung.

8.5.2.2 Metode ILCD 2011 Midpoint+

Berdasarkan hasil analisis menggunakan metode *ILCD 2011 Midpoint+*, *Reaction Unit* menunjukkan dampak terbesar pada kategori *water resource depletion* sebesar 13,41545, diikuti oleh *human toxicity, cancer effects* sebesar 6,10315 dan *freshwater ecotoxicity* sebesar 2,16082. Hasil ini menunjukkan bahwa unit reaksi memberikan kontribusi signifikan terhadap penggunaan sumber daya air serta potensi dampak terhadap kesehatan manusia, khususnya risiko efek karsinogenik. Berdasarkan analisis *contribution tree* pada kategori *acidification*, kontribusi terbesar berasal dari *ethylene production* sebesar 61,89%, diikuti oleh *market for nitrogen, liquid* sebesar 27,92%, serta penggunaan listrik sebesar 6,90%. Hal ini menunjukkan bahwa proses hulu produksi etilena merupakan faktor utama yang memengaruhi potensi pengasaman pada unit reaksi.

Tabel 8.5 Hasil Analisa *Reaction Unit Metode ILCD 2011 Midpoint+*

Kategori dampak	Nilai normalisasi
<i>Water resource depletion</i>	13.41545
<i>Human toxicity, cancer effects</i>	6.10315
<i>Freshwater ecotoxicity</i>	2.16082
<i>Ionizing radiation HH</i>	1.27474
<i>Human toxicity, non-cancer effects</i>	1.22166
<i>Photochemical ozone formation</i>	0.56718
<i>Climate change</i>	0.28995
<i>Particulate matter</i>	0.16025
<i>Acidification</i>	0.13607
<i>Terrestrial eutrophication</i>	0.08826

Berdasarkan hasil analisis menggunakan metode *ILCD 2011 Midpoint+*, *Separation Unit* menunjukkan dampak terbesar pada kategori *human toxicity, cancer effects* sebesar 9,44949, diikuti oleh *water resource depletion* sebesar 7,87032 dan *freshwater ecotoxicity* sebesar 4,10790. Hasil ini menunjukkan

bahwa unit separasi memberikan kontribusi yang signifikan terhadap potensi dampak kesehatan manusia, khususnya efek karsinogenik, serta terhadap penggunaan sumber daya air. Berdasarkan analisis *contribution tree* pada kategori *acidification*, kontribusi terbesar berasal dari *polyethylene production* sebesar 99,75%, sedangkan kontribusi dari penggunaan listrik dan udara tekan masing-masing hanya sebesar 0,23% dan 0,02%. Hal ini menunjukkan bahwa dampak pengasaman pada unit separasi didominasi oleh proses hulu (*upstream process*), bukan oleh aktivitas separasi secara langsung.

Tabel 8.6 Hasil Analisa *Separation Unit* Metode ILCD 2011 Midpoint+

Kategori dampak	Nilai normalisasi
<i>Human toxicity, cancer effects</i>	9.44949
<i>Water resource depletion</i>	7.87032
<i>Freshwater ecotoxicity</i>	4.10790
<i>Human toxicity, non-cancer effects</i>	1.36886
<i>Ionizing radiation HH</i>	0.55405
<i>Climate change</i>	0.26283
<i>Particulate matter</i>	0.14465
<i>Photochemical ozone formation</i>	0.14210
<i>Mineral, fossil & renewable resource depletion</i>	0.12873
<i>Acidification</i>	0.12474

Berdasarkan hasil analisis menggunakan metode ILCD 2011 Midpoint+, *Physical Handling Unit* menunjukkan dampak terbesar pada kategori *human toxicity, cancer effects* sebesar 9,65456, diikuti oleh *water resource depletion* sebesar 8,65673 dan *freshwater ecotoxicity* sebesar 4,16915. Hasil ini menunjukkan bahwa unit penanganan fisik memberikan kontribusi yang signifikan terhadap potensi dampak kesehatan manusia, khususnya risiko efek karsinogenik, serta penggunaan sumber daya air. Berdasarkan analisis *contribution tree* pada kategori *acidification*, kontribusi terbesar berasal dari *polyethylene production* sebesar 97,60%, sedangkan kontribusi dari penggunaan listrik hanya sebesar 2,40%. Hal ini menunjukkan bahwa dampak lingkungan

pada unit ini lebih dominan dipengaruhi oleh proses hulu (*upstream process*) dibandingkan aktivitas penanganan fisik secara langsung.

Tabel 8.7 Hasil Analisa Physical and Handling Unit Metode ILCD 2011 Midpoint+

Kategori dampak	Nilai normalisasi
<i>Human toxicity, cancer effects</i>	9.65456
<i>Water resource depletion</i>	8.65673
<i>Freshwater ecotoxicity</i>	4.16915
<i>Human toxicity, non-cancer effects</i>	1.42092
<i>Ionizing radiation HH</i>	0.61526
<i>Climate change</i>	0.27006
<i>Particulate matter</i>	0.14675
<i>Photochemical ozone formation</i>	0.14386
<i>Mineral, fossil & renewable resource depletion</i>	0.12964
<i>Acidification</i>	0.12750

Berdasarkan hasil analisis menggunakan metode ILCD 2011 *Midpoint+*, *Physical Handling Unit* menunjukkan dampak terbesar pada kategori human toxicity, cancer effects sebesar 9,65456, diikuti oleh *water resource depletion* sebesar 8,65673 dan *freshwater ecotoxicity* sebesar 4,16915. Dibandingkan dengan unit lainnya, *Physical Handling Unit* memiliki kontribusi dampak kesehatan manusia tertinggi, diikuti oleh *Separation Unit* dan *Reaction Unit*. Secara keseluruhan, hasil perbandingan antara metode CML-IA baseline dan *ILCD 2011 Midpoint+* menunjukkan bahwa metode CML lebih menekankan kategori dampak lingkungan umum, seperti *marine aquatic ecotoxicity*, sedangkan metode ILCD memberikan hasil yang lebih rinci terhadap aspek kesehatan manusia, khususnya *human toxicity cancer effects* dan *non-cancer effects*. Dengan demikian, penggunaan kedua metode memberikan gambaran yang lebih komprehensif terhadap dampak lingkungan dan kesehatan dari sistem produksi HDPE.

8.5.3 Keterbatasan Hasil LCA terhadap Tujuan dan Lingkup LCA

Meskipun hasil kajian *Life Cycle Assessment* (LCA) yang dilakukan telah mampu memberikan gambaran mengenai kontribusi masing-masing unit proses terhadap dampak lingkungan dan kesehatan pada sistem produksi HDPE, hasil tersebut tetap memiliki beberapa keterbatasan yang perlu diperhatikan dalam proses interpretasi. Penelitian ini menggunakan pendekatan *cradle-to-gate*, sehingga batas sistem hanya mencakup tahapan sejak bahan baku memasuki pabrik, diproses melalui unit *physical handling*, *reaction*, dan *separation*, hingga produk HDPE keluar dari pabrik sebagai produk akhir. Dengan demikian, tahapan distribusi produk ke konsumen, penggunaan produk selama masa pakai, serta tahap akhir siklus hidup seperti *recycling*, *incineration*, maupun pembuangan ke *landfill* belum dimasukkan ke dalam sistem analisis. Keterbatasan ruang lingkup ini menyebabkan hasil yang diperoleh belum sepenuhnya merepresentasikan keseluruhan dampak sepanjang daur hidup produk HDPE. Selain itu, karena produk HDPE pada praktiknya memiliki potensi besar untuk didaur ulang dan digunakan kembali, tidak dimasukkannya fase akhir masa pakai dapat menyebabkan hasil dampak lingkungan yang diperoleh belum menggambarkan potensi pengurangan dampak dari skenario *circular economy*.

Di sisi lain, hasil analisis juga sangat dipengaruhi oleh kualitas data inventori dan metode penilaian dampak yang digunakan. Data inventori dalam penelitian ini disusun berdasarkan hasil perancangan proses, neraca massa, neraca energi, serta data latar belakang dari basis data ecoinvent pada perangkat lunak openLCA, sehingga setiap perubahan asumsi proses, kondisi operasi, efisiensi peralatan, maupun pemilihan data *background* dapat memengaruhi hasil *Life Cycle Impact Assessment* (LCIA). Penggunaan dua metode penilaian dampak, yaitu CML-IA baseline dan ILCD 2011 Midpoint+, juga memberikan kemungkinan perbedaan hasil karena masing-masing metode memiliki model karakterisasi, faktor emisi, dan fokus kategori dampak yang berbeda, di mana CML lebih menekankan kategori dampak lingkungan umum, sedangkan ILCD memberikan rincian yang lebih spesifik terhadap aspek kesehatan manusia. Selain itu, seluruh hasil analisis dinyatakan berdasarkan unit fungsi sebesar 1 kg produk HDPE, sehingga interpretasi hasil harus selalu disesuaikan dengan basis satuan tersebut dan tidak dapat langsung digeneralisasikan untuk kapasitas produksi

skala industri tanpa dilakukan penyesuaian lebih lanjut berdasarkan laju produksi aktual pabrik.