



EVALUASI PROGRAM UNGGULAN PENGELOLAAN LINGKUNGAN PLTU X JAWA TIMUR MENGGUNAKAN LIFE CYCLE ASSESSMENT (LCA)

Maya Maharani¹, Joni Hermana² dan Adhi Yuniarto²

¹ Program Magister Teknik Lingkungan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember

² Departemen Teknik Lingkungan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Email: hermana@its.ac.id

ABSTRAK

Dalam kegiatan proses produksi energi listrik PLTU dengan bahan bakar batu bara, beberapa unit proses akan menghasilkan emisi yang berpotensi menimbulkan dampak pada lingkungan dan kesehatan manusia. Tujuan dari penelitian ini yaitu menganalisis dampak lingkungan yang paling dominan dan unit operasi yang memberikan kontribusi dampak lingkungan paling besar sehingga dapat menjadi inputan untuk mengevaluasi program yang telah diimplementasikan di perusahaan untuk mengurangi dampak lingkungan. Analisis dampak lingkungan dilakukan dengan metode LCA menggunakan aplikasi SimaPro dengan metode CML-1A dan ReCiPe. Hasil analisis LCA menunjukkan bahwa proses produksi 1 kWh listrik memberikan kontribusi dampak lingkungan yang paling dominan berdasarkan metode CML-1A Baseline yaitu *abiotic depletion fossil fuel* sebesar 11,62466 MJ dan berdasarkan metode ReCiPe 2016 Midpoint yaitu dampak *global warming* sebesar 1,049575 kg CO₂ dan dampak *terrestrial acidification* sebesar 0,003672 kg SO₂ eq.

Kata kunci: PLTU, Batubara, LCA

ABSTRACT

*In the process of producing electricity from coal fired power plant, several process units will produce emissions that may have an impact on the environment and human health. The purpose of this study is to analyze the most dominant environmental impact and the operating unit that contributes the most to the environmental impact so that it can be used as input for programs implemented in the company to reduce environmental impacts. Environmental impact analysis was carried out using the LCA method using the SimaPro application with the CML-1A and ReCiPe methods. The results of the LCA analysis showed that the production process per 1 kWh of electricity contributes the most dominant environmental impact based on the CML-1A Baseline method is *abiotic depletion fossil fuel* of 11,62466 MJ and based on the ReCiPe 2016 Midpoint method are *global warming* of 1,049575 kg CO₂ and *terrestrial acidification*. of 0,003672 kg SO₂ eq.*

Keywords: coal fired power plant, coal, LCA

PENDAHULUAN

Proses produksi energi listrik PLTU ini meliputi unit proses desalinasi, demineralisasi, kondenser, heater, boiler, turbin, generator, dan trafo dengan jumlah produksi netto pada tahun 2020 mencapai 4.186.476 kWh. Dalam rangkaian kegiatan proses produksi energi listrik, masing-masing unit proses PLTU berpotensi menimbulkan dampak emisi yang dapat menyebabkan pencemaran terhadap lingkungan dan kesehatan manusia melalui media udara, air, dan tanah.

Potensi pencemaran udara yang timbul dari proses produksi listrik salah satunya berasal dari konsumsi energi. Konsumsi energi utama di PLTU berkaitan dengan penggunaan batu bara pada proses pembakaran di boiler dan penggunaan energi listrik di setiap unit proses produksi. Proses pembakaran batu bara akan menghasilkan emisi yang dilepaskan ke lingkungan diantaranya adalah CO₂, CH₄, N₂O, SO₂ dan NO_x. Emisi gas rumah kaca seperti CO₂, CH₄, dan N₂O yang dilepaskan ke atmosfer berkontribusi terhadap terjadinya dampak global warming. Emisi gas konvensional seperti SO₂ and NO_x memiliki sifat toksik yang dapat menimbulkan dampak terhadap kesehatan manusia berupa gangguan sistem pernapasan serta berkontribusi besar terhadap lingkungan yaitu penyebab terjadinya hujan asam.

Potensi pencemaran air yang timbul dari proses produksi listrik salah satunya berasal dari emisi air limbah *blowdown* boiler yang mengandung Cu dari proses korosi instalasi boiler. Cu yang terbawa saat proses cleaning boiler, berpotensi menyebabkan dampak lingkungan berupa *human toxicity*, *marine aquatic ecotoxicity*, dan *terrestrial ecotoxicity*.

Produk samping yang dihasilkan dari proses produksi listrik yaitu limbah *fly ash* dan *bottom ash* yang dihasilkan dari proses pembakaran di boiler. Karakteristik *Fly ash* dan *bottom ash* mengandung senyawa diantaranya SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO, dan MgO yang berpotensi menyebabkan pencemaran air tanah apabila tidak dilakukan pengelolaan lanjut sesuai dengan regulasi.

Berbagai dampak yang menyebabkan perubahan lingkungan akibat proses produksi PLTU ini harus dikaji dan ditelaah secara

komprehensif sebagai upaya pengelolaan dan pemantauan dampak lingkungan, sehingga dampak yang diperkirakan timbul tersebut dapat dicegah atau diminimalisir. Salah satu metode analisis yang dapat digunakan adalah metode analisis penilaian daur hidup atau *Life Cycle Assessment* (LCA).

LCA dapat digunakan sebagai metode ilmiah untuk mengidentifikasi material, sumber energi dan emisi yang dapat muncul pada keseluruhan daur hidup sebuah produk (Klopffer dan Grahl 2014). Metode ini nantinya akan menghasilkan output berupa proses atau aktivitas yang memberikan dampak paling besar terhadap lingkungan, dimana hasil tersebut akan dijadikan sebagai acuan dalam menentukan alternatif-alternatif perbaikan untuk mengurangi dampak lingkungan yang ditimbulkan (Kautzar dkk., 2015). Oleh karena itu, LCA dapat digunakan untuk membantu penentuan strategi dalam pembuatan keputusan, untuk meningkatkan kualitas produk dan efisiensi proses serta mempelajari aspek lingkungan dari suatu produk (Putri, 2017)

Beberapa program pengoperasian pembangkit telah diimplementasikan dengan tujuan untuk memperbaiki kinerja pengelolaan lingkungan, namun perlu dilakukan analisis agar dapat mengetahui dampak lingkungan pada proses produksi dan titik kritis (*hotspot*) penyebab dampak. LCA dilakukan untuk mengetahui kuantitas dampak lingkungan dari proses produksi listrik dan unit proses yang memberikan kontribusi dampak lingkungan paling besar selama daur hidup produk.

METODE PENELITIAN

Analisis dampak lingkungan dengan metode LCA meliputi tahapan berikut:

1. Goals and Scope Definition

Tahapan pertama yaitu pendefinisian *goal* dan *scope*. *Goal* adalah pembuatan pernyataan terkait tujuan yang ingin dicapai dan kepada siapa hasil LCA akan di komunikasikan. *Scope* adalah penentuan hal-hal yang perlu didetailkan dalam penelitian yaitu:

- *Functional unit*, merupakan satuan produk yang digunakan
- *Product system*, merupakan alur produksi listrik

- *System boundaries*, merupakan ruang lingkup proses penelitian yaitu *gate to gate* mulai dari unit proses condenser, heater, boiler, turbin, hingga generator-trafo ke sistem transmisi.

2. Life Cycle Inventory (LCI)

Langkah-langkah yang dilakukan pada tahapan ini mencakup:

- Pengumpulan data yang mencakup spesifikasi semua aliran input dan output dari proses dalam sistem produk (yaitu *product flows*, *flow* ke proses unit lain, dan *elementary flow* dari dan ke lingkungan).
- Menghubungkan data ke unit proses dan unit fungsi terhadap produk energi listrik berupa diagram alir dengan memperhatikan kesetimbangan material (*mass balance*) antara input data bahan baku, bahan bakar, bahan kimia, dan energi yang digunakan dengan output data produk, emisi maupun limbah yang dihasilkan
- Agregasi data yaitu penggabungan unit fungsi menjadi suatu *product system* terhadap produk energi listrik berupa diagram alir. Pada tahap ini dilakukan pengumpulan data input dan output dari setiap unit proses berdasarkan data sekunder dari laporan perusahaan. Untuk satuan yang belum sama, maka dilakukan konversi nilai satuan pada setiap unit proses ke dalam satuan yang sama untuk mempermudah penginputan dan pengolahan data pada *software* SimaPro. Pada tahap ini dibutuhkan durasi yang cukup lama dikarenakan kualitas, akurasi dan representasi data akan sangat mempengaruhi hasil interpretasi akhir.

3. Life Cycle Impact Assessment (LCIA)

Pada tahap ini langkah-langkah yang dilakukan yaitu:

- Pemilihan kategori dampak, indikator kategori dan model karakterisasi, dimana metode yang digunakan yaitu CML-1A dan ReCiPe 2016 (H). Pendekatan kategori analisis dampak pada penelitian ini, yaitu secara *midpoint*.
- Klasifikasi, dimana data input dan output yang merupakan *elementary flow* pada tahapan LCI kemudian diklasifikasi berdasarkan kategori dampak pada metode ReCiPe 2016 (H). Contohnya seperti emisi CO₂ yang dihasilkan dari proses pembakaran bahan bakar termasuk kedalam kategori dampak global warming berdasarkan metode ReCiPe 2016 (H). Klasifikasi dapat digambarkan dengan diagram alir.

- Karakterisasi, dimana semua *elementary flow* dari LCI dinilai menurut faktor kontribusinya pada suatu dampak dengan dikalikan dengan *characterization factor* sesuai metode LCIA.
- Normalisasi, merupakan tahap opsional dalam LCIA. Normalisasi merupakan hasil dari karakterisasi dibagi dengan faktor normalisasi sesuai metode CML-1A dan ReCiPe 2016 (H). Normalisasi dilakukan untuk menyamakan satuan unit dampak agar mempermudah dalam membandingkan antar kategori dampak.
- Pembobotan merupakan tahap opsional dalam LCIA, pembobotan adalah proses mengkonversi hasil indikator dari kategori dampak yang berbeda menggunakan faktor pembobotan metode CML-1A dan ReCiPe 2016 (H). Pembobotan dilakukan untuk mempermudah perbandingan dampak yang dihasilkan antar perbandingan produk.

4. Interpretasi Data

Interpretasi data adalah tahapan terakhir dari LCA, langkah-langkah yang dilakukan yaitu:

- Identifikasi masalah penting dengan menggunakan *hotspot analysis*. *Hotspot analysis* adalah analisis suatu sistem produksi yang memiliki kontribusi yang signifikan terhadap dampak lingkungan. *Hotspot analysis* bermanfaat untuk mengidentifikasi lokasi diprioritaskan untuk dilakukan tindakan untuk perbaikan lingkungan.
- Evaluasi data dengan melakukan 3 pemeriksaan yaitu *completeness check*, *sensitivity check* dan *consistency check*
- Membuat kesimpulan dan rekomendasi.

Pemilihan Metode LCIA

Metode LCIA dikembangkan untuk menghubungkan hasil LCIA dengan dampak lingkungan yang relevan, dimana hasilnya akan diklasifikasikan dalam berbagai kategori dampak dengan besaran tertentu. Menurut Menoufi et al. (2013), dalam menentukan besar dampak lingkungan pada tahap karakterisasi, terdapat dua pendekatan yang dapat digunakan, yaitu pendekatan *midpoint* dan *endpoint*.

Pendekatan *midpoint* lebih berfokus pada masalah lingkungan tunggal, seperti *climate change*, *ozone depletion*, asidifikasi, dan lain-lain. Sehingga, nilai akhir dari besaran dampak yang ditimbulkan hanya menggambarkan sebab-akibat dampak lingkungan awal yang akan muncul dari data pada tahap LCI. Sedangkan

pada pendekatan *endpoint*, dampak lingkungan yang dihasilkan berada pada tingkat pengkategorian yang lebih tinggi dan besar, seperti *human health*, *ecosystem quality*, dan *natural resources*.

Dalam kajian LCA ini, digunakan pendekatan penilaian dampak *midpoint* dikarenakan pendekatan midpoint bersifat lebih spesifik dan menekankan perubahan fisik-kimia di lingkungan. Sedangkan pendekatan *endpoint* bersifat lebih global dan menekankan perubahan biologis. Jumlah indikator dampak untuk menunjukkan nilai akhir besaran dampak pada pendekatan *midpoint* bergantung pada metode yang digunakan.

Kategori dampak pada penelitian ini disesuaikan dengan kriteria Proper pada Peraturan Menteri KLHK No 1 tahun 2021, meliputi 4 dampak primer (*global warming potential*, potensi penipisan ozon, potensi hujan asam, dan potensi eutrofikasi) serta 7 dampak sekunder (*photochemical oxidation*, potensi terjadi penurunan abiotik, potensi terjadi penurunan biotik, karsinogenik, *toxicity*, *water footprint*, dan *land use change*). Hal tersebut mendasari metode yang digunakan pada penelitian ini yaitu metode CML-IA dan ReCiPe 2016 Midpoint (H) yang merepresentasikan analisis terhadap 11 kategori dampak pada proses produksi. Kategori dampak CML-IA, ReCiPe Midpoint 2016 (H), dan pemilihan metode berdasarkan kriteria Proper ditampilkan pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Pemilihan Metode LCIA Berdasarkan Kategori Dampak pada PROPER

No	Kategori Dampak			Pemilihan Metode	Unit
	CML	ReCiPe	PROPER		
1	<i>Abiotic depletion</i>	<i>Global warming</i>	Dampak Primer		
2	<i>Abiotic depletion (fossil fuels)</i>	<i>Stratospheric ozone depletion</i>	1. <i>Global Warming Potential</i>	ReCiPe 2016	kg CO ₂ eq
3	<i>Global warming</i>	<i>Ionizing radiation</i>	2. Potensi penipisan Ozon	ReCiPe 2016	kg CFC11 eq
4	<i>Ozone layer depletion</i>	<i>Ozone formation, Human health</i>	3. Potensi Hujan Asam	ReCiPe 2016	kg SO ₂ eq
5	<i>Human toxicity</i>	<i>Fine particulate matter formation</i>	4. Potensi Eutrofikasi	CML-IA	kg PO ₄ eq
6	<i>Fresh water aquatic ecotox.</i>	<i>Ozone formation, Terrestrial ecosystems</i>	Dampak Sekunder		
7	<i>Marine aquatic ecotoxicity</i>	<i>Terrestrial acidification</i>	1. <i>Photochemical oxidation</i>	CML-IA	kg C ₂ H ₄ eq
8	<i>Terrestrial ecotoxicity</i>	<i>Freshwater eutrophication</i>	2. Potensi terjadi penurunan abiotik (fossil dan non fossil)		
9	<i>Photochemical oxidation</i>	<i>Marine eutrophication</i>	- <i>Abiotic depletion (fossil fuels)</i>	CML-IA	MJ
10	<i>Acidification</i>	<i>Terrestrial ecotoxicity</i>	- <i>Abiotic depletion</i>	CML-IA	kg Sb eq
11	<i>Eutrophication</i>	<i>Freshwater ecotoxicity</i>	3. Potensi terjadi penurunan biotik		
12		<i>Marine ecotoxicity</i>	- <i>Terrestrial ecotoxicity</i>	ReCiPe 2016	kg 1,4-DCB
13		<i>Human carcinogenic toxicity</i>	- <i>Freshwater ecotoxicity</i>	ReCiPe 2016	kg 1,4-DCB
14		<i>Human non-carcinogenic toxicity</i>	- <i>Marine ecotoxicity</i>	ReCiPe 2016	kg 1,4-DCB
15		<i>Land use</i>	4. Karsinogenik	ReCiPe 2016	kg 1,4-DCB
16		<i>Mineral resource scarcity</i>	5. <i>Toxicity</i>	CML-IA	kg 1,4-DB eq
17		<i>Fossil resource scarcity</i>	6. <i>Water Footprint</i>	ReCiPe 2016	m ³
18		<i>Water consumption</i>	7. <i>Land Use Change</i>	ReCiPe 2016	m ² a crop eq

Pada **Tabel 1** dapat disimpulkan bahwa metode yang utama digunakan adalah metode ReCiPe 2016 Midpoint (H) yang merupakan hasil penyempurnaan dari ReCiPe 2008 dan

sebelumnya yaitu CML 2000 dan Eco-indicator 99. Beberapa keuntungan dari metode ReCiPe dibandingkan dengan metode lain yaitu:

- Kumpulan kategori dampak pada level midpoint yang luas dengan 18 indikator dampak.
- Memungkinkan untuk digunakan sebagai mekanisme dampak yang memiliki cakupan global.

Sedangkan beberapa kategori dampak menggunakan metode CML karena tidak tersedia pada metode ReCiPe diantaranya yaitu potensi eutrofikasi, *photochemical oxidation*, potensi penurunan abiotik, dan *toxicity*.

Penentuan dampak lingkungan dan hotspot dampak pada proses produksi ditetapkan berdasarkan nilai normalisasi terbesar yang didapatkan pada masing-masing analisis metode CML-IA dan ReCiPe 2016 Midpoint (H.).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis LCA merupakan suatu metode yang bertujuan untuk melakukan penilaian dampak lingkungan yang ditimbulkan dari daur hidup suatu produk. Tahapan LCA proses produksi listrik dilakukan sebagai berikut:

1. Goal and Scope Definition

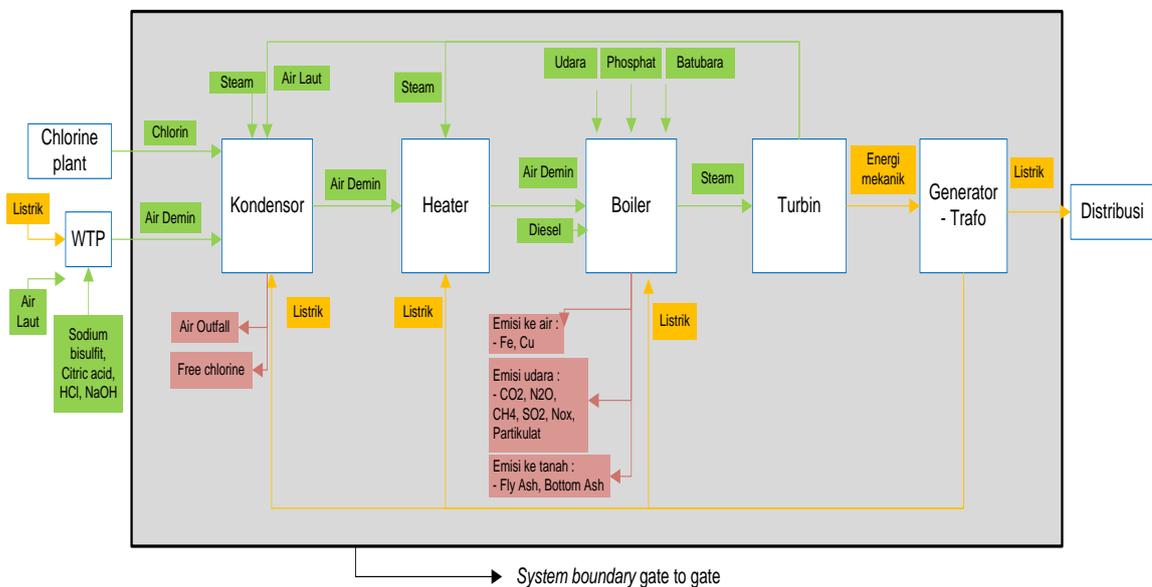
a). Goal

Tujuan pada kajian LCA ini adalah untuk mengidentifikasi besaran dampak lingkungan yang ditimbulkan dari proses produksi listrik

PLTU dan melakukan evaluasi program pengelolaan yang telah dilakukan sebagai upaya penurunan besaran dampak lingkungan terkait pengurangan pencemaran udara serta peningkatan efisiensi energi.

b) Scope

Ruang lingkup pada kajian LCA ini dilakukan berdasarkan Asosiasi Lingkungan Ketenagalistrikan Indonesia (ALLIN) yaitu sistem *gate to gate*, dimulai dari kondensor, heater, boiler, turbin hingga generator-trafo. *Functional unit* yang digunakan adalah 1 kWh listrik, dengan sumber bahan bakar utama yaitu batubara yang berasal dari Kalimantan Selatan jenis *low rank coal* (lignite) dengan nilai kalori sekitar 3900 – 4200 Kcal/kg (7020 – 7560 BTU/lb) dan *total moisture* sebesar 33%. Data yang digunakan merupakan data sekunder dalam 1 tahun yaitu tahun 2020 meliputi data input berupa bahan baku, bahan kimia, bahan bakar, dan energi yang digunakan, serta data output berupa produk dan emisi yang ditimbulkan dari proses produksi listrik. Metode LCA yang digunakan yaitu ReCiPe 2016 Midpoint dan CML-IA yang diintegrasikan dengan kriteria Proper pada Peraturan Menteri KLHK No 1 tahun 2021 sehingga dapat menampilkan kategori dampak yang meliputi 4 dampak primer dan 7 dampak sekunder.



Gambar 1. System Boundary Kajian LCA

2. Life Cycle Inventory (LCI)

Dalam tahap penentuan LCI dilakukan inventarisasi data input dan output dari suatu produk di sepanjang daur hidupnya, yang

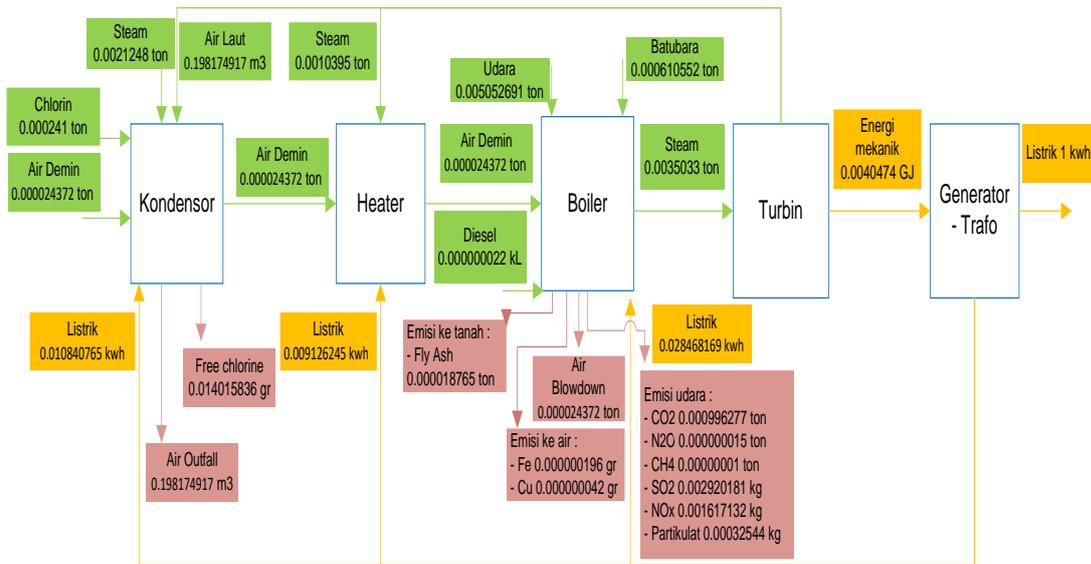
didasarkan pada *goal and scope* yang telah ditentukan sebelumnya.

Inventarisasi data proses produksi energi listrik selama periode Januari – Desember 2020

dan neraca massa proses produksi listrik berdasarkan *functional unit* dapat dilihat pada **Tabel 2** dan **Gambar 2** berikut:

Tabel 2. Inventarisasi Data Produksi Listrik

Unit Proses	Input/ Output	Jenis Data	Jumlah	Satuan	Normalisasi	Satuan
Kondensor	Input	Air laut	869.839.000	ton	0,19817	ton/kWh
		Air Demin	106.975,93	ton	0,00002	ton/kWh
		Steam	9.326.049,49	ton	0,00212	ton/kWh
		Listrik	45.384,6	kwh	0,01084	kWh/kWh
	Output	Air Demin	106.975,93	ton	0,00002	ton/kWh
		Air Outfall	869.839.000	ton	0,19817	ton/kWh
Heater	Input	Air Demin	106.975,93	ton	0,000024	ton/kWh
		Steam	4.562.386,07	ton	0,00104	ton/kWh
		Listrik	38.206,81	kwh	0,00913	kWh/kWh
	Output	Air Demin	106.975,93	ton	0,000024	ton/kWh
Boiler	Input	Batu bara	2.679.864,22	ton	0,00061	ton/kWh
		Listrik	119.181,31	kwh	0,02847	kWh/kWh
		Udara	22.177.517,95	ton	0,00505	ton/kWh
		Air Demin	106.975,93	ton	0,000024	ton/kWh
	Output	Steam	15.376.781,3	ton	0,0035	ton/kWh
		CO ₂	4.372.726,68	ton	0,001	ton/kWh
		N ₂ O	63,9	ton	1,5E-08	ton/kWh
		CH ₄	42,64	Ton	1E-08	ton/kWh
		SO ₂	12.817,4	Ton	0,00292	ton/kWh
		NO _x	7.098	Ton	0,00162	ton/kWh
		Partikulat	1.428,4	Ton	0,00033	ton/kWh
		Fe	0,00083	Ton	2E-07	ton/kWh
		Cu	0,0001985	Ton	4,2E-08	ton/kWh
		Fly ash	82.364	Ton	1,9E-05	ton/kWh
Turbin	Input	Steam	15.376.781,3	Ton	0,0035	ton/kWh
	Output	Steam	9.326.386,07	Ton	0,00212	ton/kWh
		Steam	4.562.379,97	Ton	0,00104	ton/kWh
		Energi mekanik	17.765.043,12	GigaJoule	0,00405	GJ/kWh
Generator - Trafo	Input	Energi mekanik	17.765.043,12	GigaJoule	0,00405	GJ/kWh
	Output	Listrik	4.434.853	kWh	1	kWh



Gambar 2. Neraca Massa Proses Produksi Listrik

3. Life Cycle Impact Assessment (LCIA)

Tahapan selanjutnya setelah LCI yaitu prakiraan dampak lingkungan potensial berdasarkan data input dan output pada setiap unit proses produksi listrik. Tahap LCIA bertujuan untuk membuat hasil dari analisis LCI menjadi lebih mudah dipahami dan dikelola yang berkaitan dengan kesehatan manusia, ketersediaan sumber daya dan lingkungan.

Dalam kajian LCA ini digunakan pendekatan penilaian dampak midpoint dikarenakan pendekatan midpoint bersifat lebih spesifik dan menekankan perubahan fisik-kimia di lingkungan. Tahapan penilaian dampak yang dilakukan yaitu karakterisasi, dan normalisasi dengan menggunakan metode CML-1A Baseline dan ReCiPe. Penilaian dampak ini bertujuan untuk mengidentifikasi seberapa besar kontribusi suatu proses terhadap dampak lingkungan yang dihasilkan dari suatu proses tersebut.

- Karakterisasi

Karakterisasi adalah tahap identifikasi dan pengelompokan data input yang didapatkan dari tahap LCI kedalam kategori dampak lingkungan sesuai dengan metode serta database yang digunakan. Tahap ini akan mengukur kontribusi dampak suatu produk atau kegiatan pada setiap indikator dampak. Nilai karakterisasi dampak lingkungan pada proses

produksi listrik PLTU ditampilkan pada **Tabel 3**.

Dari tahap karakterisasi dapat disimpulkan bahwa untuk menghasilkan 1 kWh listrik di PLTU menimbulkan 9 kategori dampak terdiri dari dampak primer yaitu dampak global warming yang dihasilkan sebesar 1,049575 kg CO₂ eq, potensi penipisan ozon (stratospheric ozone depletion) yang dihasilkan sebesar 1,73E-07 kg CFC11 eq, dampak potensi hujan asam (terrestrial acidification) yang dihasilkan sebesar 0,004522 kg SO₂ eq, dan potensi eutrofikasi (eutrophication) yang dihasilkan sebesar 0,000225 kg PO₄ eq.

Dampak sekunder meliputi photochemical oxidation yang dihasilkan sebesar 0,000147 kg C₂H₄ eq, *abiotic depletion (fossil fuels)* yang dihasilkan sebesar 11,62466 MJ. Potensi terjadi penurunan biotik terdiri dari dampak *terrestrial ecotoxicity* yang dihasilkan sebesar 4,45E-25 kg 1,4-DCB, *freshwater ecotoxicity* yang dihasilkan sebesar 7,13E-09 kg 1,4-DCB, dan *marine ecotoxicity* yang dihasilkan sebesar 8,50E-09 kg 1,4-DCB. Dampak *human toxicity* yang dihasilkan sebesar 0,002329 kg 1,4-DB.

Sedangkan dampak *abiotic depletion (non fossil fuel)* bernilai 0 karena tidak adanya input material bersifat *non fossil fuel*, dampak *carcinogenic toxicity* bernilai 0 karena tidak adanya input penggunaan material/bahan yang bersifat karsinogen, dampak *water footprint* bernilai 0 karena tidak ada penggunaan air yang

berasal dari mata air, air hujan atau air limbah yang digunakan untuk mengasimilasi atau melarutkan polutan pada proses produksi, dan dampak *land use change* bernilai 0 karena tidak ada pembukaan lahan baru, alih fungsi lahan, serta kerusakan hutan.

Tabel 3. Nilai Karakterisasi Dampak Proses Produksi Listrik

No	Kategori Dampak	Unit	Metode	Nilai
Dampak Primer				
1	<i>Global Warming Potential</i>	kg CO ₂ eq	ReCiPe 2016 Midpoint (H)	1,049575
2	<i>Potensi penipisan Ozon (Stratospheric Ozon Depletion)</i>	kg CFC11 eq	ReCiPe 2016 Midpoint (H)	1,73E-07
3	<i>Potensi Hujan Asam (Terrestrial Acidification)</i>	kg SO ₂ eq	ReCiPe 2016 Midpoint (H)	0,004522
4	<i>Potensi Eutrofikasi (Eutrophication)</i>	kg PO ₄ eq	CML-IA Baseline	0,000225
Dampak Sekunder				
5	<i>Photochemical oxidation</i>	kg C ₂ H ₄ eq	CML-IA Baseline	0,000147
6	Potensi terjadi penurunan abiotik (fossil dan non fossil)			
	<i>Abiotic depletion (fossil fuels)</i>	MJ	CML-IA Baseline	11,624655
	<i>Abiotic depletion</i>	kg Sb eq	CML-IA Baseline	0
7	Potensi terjadi penurunan biotik			
	<i>Terrestrial ecotoxicity</i>	kg 1,4-DCB	ReCiPe 2016 Midpoint (H)	4,45E-25
	<i>Freshwater ecotoxicity</i>	kg 1,4-DCB	ReCiPe 2016 Midpoint (H)	7,13E-09
	<i>Marine ecotoxicity</i>	kg 1,4-DCB	ReCiPe 2016 Midpoint (H)	8,50E-09
8	<i>Karsinogenik (carcinogenic toxicity)</i>	kg 1,4-DCB	ReCiPe 2016 Midpoint (H)	0
9	<i>Toxicity (human toxicity)</i>	kg 1,4-DB eq	CML-IA Baseline	0,002329
10	<i>Water Footprint</i>	m ³	ReCiPe 2016 Midpoint (H)	0
11	<i>Land Use Change</i>	m ² a crop eq	ReCiPe 2016 Midpoint (H)	0

Sumber: *Software SimaPro 9.0*

• **Normalisasi**

Tahap normalisasi menunjukkan kontribusi relatif dari semua kategori dampak lingkungan dan dimaksudkan untuk menciptakan satuan yang seragam untuk semua kategori dampak. Nilai normalisasi dapat diketahui dengan mengalikan nilai karakterisasi

dengan faktor normalisasi, dengan demikian semua kategori dampak memiliki unit satuan yang sama. Tujuan dari penyetaraan satuan ialah agar dapat membandingkan besaran dari hasil penilaian dampak (LCIA) pada setiap unit proses yang telah dihitung menggunakan *software SimaPro 9.0*.

Tabel 4. Nilai Normalisasi Proses Produksi Listrik

No	Kategori Dampak	Metode	Unit Proses				
			Kondensor	Heater	Boiler	Turbin	Generator
Dampak Primer							
1	<i>Global Warming Potential</i>	ReCiPe 2016 Midpoint (H)	1,36E-06	1,14E-06	0,000129	0	0
2	Potensi penipisan Ozon	ReCiPe 2016 Midpoint (H)	2,99E-08	2,51E-08	2,83E-06	0	0
3	Potensi Hujan	ReCiPe 2016 Midpoint (H)	9,26E-07	7,80E-07	8,79E-05	0	0
4	Potensi Eutrofikasi	CML-IA Baseline	4,42E-15	3,72E-15	4,23E-13	0	0
Dampak Sekunder							
5	<i>Photochemical oxidation</i>	CML-IA Baseline	8,37E-15	7,05E-15	7,92E-13	0	0
6	Potensi terjadi penurunan abiotik (fossil dan non fossil)						
	<i>Abiotic depletion (fossil fuels)</i>	CML-IA Baseline	3,39E-14	2,85E-14	3,22E-12	0	0
	<i>Abiotic depletion</i>	CML-IA Baseline	0	0	0	0	0
7	Potensi terjadi penurunan biotik						
	<i>Terrestrial ecotoxicity</i>	ReCiPe 2016 Midpoint (H)	4,44E-30	3,74E-30	4,21E-28	0	0
	<i>Freshwater ecotoxicity</i>	ReCiPe 2016 Midpoint (H)	6,01E-11	5,06E-11	5,70E-09	0	0
	<i>Marine ecotoxicity</i>	ReCiPe 2016 Midpoint (H)	8,52E-11	7,17E-11	8,08E-09	0	0
8	Karsinogenik	ReCiPe 2016 Midpoint (H)	0	0	0	0	0
9	<i>Toxicity (human toxicity)</i>	CML-IA Baseline	1,29E-16	1,08E-16	1,21E-14	0	0
10	<i>Water Footprint</i>	ReCiPe 2016 Midpoint (H)	0	0	0	0	0
11	<i>Land Use Change</i>	ReCiPe 2016 Midpoint (H)	0	0	0	0	0

Dari integrasi data normalisasi dampak lingkungan pada **Tabel 4** dapat disimpulkan bahwa untuk menghasilkan 1 kWh listrik PLTU menimbulkan 9 (sembilan) kategori dampak. Dampak yang dihasilkan selama proses produksi energi listrik terdiri dari dampak primer yaitu *global warming* dengan nilai 0,000129, potensi penipisan ozon (*stratospheric ozone depletion*) sebesar 2,83E-06, dampak potensi hujan asam (*terrestrial acidification*) sebesar 8,79E-05, dan potensi eutrofikasi (*eutrophication*) sebesar 4,23E-13.

Dampak sekunder meliputi *photochemical oxidation* sebesar 7,92E-13, *abiotic depletion (fossil fuels)* sebesar 3,22E-12. Potensi terjadi penurunan biotik terdiri dari dampak *terrestrial ecotoxicity* sebesar 4,21E-28, *freshwater ecotoxicity* sebesar 5,70E-09, dan *marine ecotoxicity* sebesar 8,08E-09. Dampak *human toxicity* sebesar 1,21E-14. Sedangkan

besaran normalisasi dampak pada unit proses turbin dan generator bernilai 0 dikarenakan tidak adanya output/ emisi ke lingkungan saat proses produksi.

KESIMPULAN

Berdasarkan analisis LCA dengan metode CML-IA Baseline dan ReCiPe 2016 Midpoint (H), diketahui bahwa dampak lingkungan yang ditimbulkan dari proses produksi listrik PLTU dengan acuan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan No. 1 tahun 2021 terdiri dari :

- 4 dampak primer
 1. *Global Warming Potential*, sebesar 1,049575 kg CO₂ eq
 2. Potensi penipisan ozon, sebesar 1,73E-07 kg CFC11 eq
 3. Potensi hujan asam, sebesar 0,004522 kg SO₂ eq

4. Potensi eutrofikasi, sebesar 0,000225 kg PO₄ eq
- 4 dampak dari 7 dampak sekunder
 1. *Photochemical oxidation*, sebesar 0,000147 kg C₂H₄ eq
 2. Potensi terjadi penurunan abiotik, yaitu *abiotic depletion (fossil fuel)*, sebesar 11,6246 MJ
 3. Potensi terjadi penurunan biotik, meliputi :
 - *Terrestrial ecotoxicity*, sebesar 4,45E-25 kg 1,4-DCB
 - *Freshwater ecotoxicity*, sebesar 7,13E-09 kg 1,4-DCB
 - *Marine ecotoxicity*, sebesar 8,50E-09 kg 1,4-DCB
 4. *Toxicity*, sebesar 0,002329 kg 1,4-DB eq

Unit proses yang memberikan kontribusi dampak lingkungan yang paling dominan dari proses produksi 1 kWh listrik adalah boiler dan dampak terbesar pada sistem boiler berdasarkan metode CML-IA Baseline yaitu *abiotic depletion fossil fuel* sebesar 11,62466 MJ dan berdasarkan metode ReCiPe 2016 Midpoint yaitu dampak *global warming* sebesar 1.049575 kg CO₂ dan dampak *terrestrial acidification* sebesar 0,003672 kg SO₂ eq.

DAFTAR PUSTAKA

- Bagaswara M.E.A, dan Hadi, Y. 2017. Analisis dan Rekayasa Proses Produksi untuk Mengendalikan Environmental Impact Menggunakan Metode LCA. *Jurnal Metris*. 18 : 95-104.
- Bayer, C., Gambel, M., Gentry, R., dan Joshi, S. 2010. *AIA Guide to Building Life Cycle Assessment in Practice*. The American Institute of Architects. New York.
- Bruijn, H.D., Duin, V.R., dan Huijbregts, M.A.J. 2002. *Handbook on Life Cycle Assessment*. Kluwer Academic Publisher: New York.
- EPA. 2006. *Life Cycle Assessment: Principles and Practice*.
- Hauschild, M.Z., Rosenbaum, R.K., dan Olsen, S.I. 2018. *Life Cycle Assessment Theory and Practice*. Springer. Switzerland.
- Karlinasari, L., Hanafi, J., dan Damanik, M., 2021. *Life Cycle Assessment (LCA) Cradle to Gate Produksi Batu Bara di PT XYZ Kalimantan Selatan*. IPB. Bogor.
- Klöpffer W, Grahl B. 2014. *Life Cycle*

- Assessment (LCA): A Guide to Best Practice*. Weinheim (DE): WileyVCH Verlag GmbH.
- Kautzar, Galuh Zuhria, et al. 2015. *Analisis Dampak Lingkungan Pada Aktivitas Supply Chain Produk Kulit Menggunakan Metode LCA dan ANP*. Malang: Universitas Brawijaya.
- Menoufi, K.A.I. 2011. *Life Cycle Analysis and Life Cycle Impact Assessment Methodologies: A State of the Art*. Universitat de Lleida. Spanyol.
- Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral. 2018. *Pedoman Penghitungan dan Pelaporan Inventarisasi Gas Rumah Kaca*. Indonesia.
- Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan. 2021. *Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 1 Tentang Program Penilaian Peringkat Kinerja Perusahaan dalam Pengelolaan Lingkungan Hidup*. Indonesia.
- Pre. 2014. *All About SimaPro 8*. <URL : <https://www.presustainability.com/>>
- Putri, P., H. 2017. *Life Cycle Assessment (LCA) Emisi Pada Proses Produksi Bahan Bakar Minyak (BBM) Jenis Bensin Dengan Pendekatan Metode Analytical Hierarchy Process (AHP)*. Tugas Akhir Departemen Teknik Lingkungan FTSLK ITS.
- SNI ISO 14040. 2016. *Manajemen Lingkungan - Penilaian Daur Hidup – Prinsip dan Kerangka Kerja*. Badan Standarisasi Nasional. Jakarta.
- SNI ISO 14044. 2017. *Manajemen Lingkungan - Penilaian Daur Hidup – Persyaratan dan Panduan*. Badan Standarisasi Nasional. Jakarta.
- Sonnemann, G., dan Margni, M. 2015. *Life Cycle Management*. Springer. Netherlands
- Sulistiyono. 2010. “Pemanasan Global (Global Warming) dan Hubungannya dengan Penggunaan Bahan Bakar Fosil. *Forum Teknologi*, Vol. 02 No. 02.
- Valentina, Novia. 2011. *Life Cycle Anaysis dan Ecological Footprint sebagai Model Pendukung Pembangunan Berkelanjutan*. Yogyakarta: Universitas Gadjah Mada.