



ANALISIS DAMPAK LINGKUNGAN PADA PENGOLAHAN AIR BERSIH DI IPA UNIT 1 CENDANA SAMARINDA MENGGUNAKAN METODE *LIFE CYCLE ASSESSMENT*

Erdita Cahya Kinanti*, Edhi Sarwono, dan Muhammad Busyairi

Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Mulawarman.
Jalan Sambaliung No. 9 Kampus Gunung Kelua, Samarinda, Provinsi Kalimantan Timur

*Korespondensi penulis: erditacahyakinanti@gmail.com

ABSTRAK

IPA Unit 1 Cendana merupakan unit pengolahan air yang memiliki kapasitas sebesar 300 liter/detik. Produksi air bersih pada IPA Unit 1 Cendana memerlukan kinerja unit pengolahan secara maksimal dengan menggunakan bahan kimia dan energi listrik dalam jumlah yang besar, sehingga berpotensi sebagai kontributor dampak negatif terhadap lingkungan akibat emisi yang dihasilkan. Analisis dampak negatif suatu kegiatan ke lingkungan dapat dihitung menggunakan beberapa pendekatan, salah satunya yaitu pendekatan menggunakan metode *Life Cycle Assessment* (LCA). Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kategori dampak yang timbul dan *hotspot* pada proses pengolahan air bersih di IPA Unit 1 Cendana serta memberikan usulan rekomendasi berdasarkan hasil analisis LCA yang telah dilakukan. Analisis LCA menggunakan bantuan *software* OpenLCA 2.3.1 dengan metode pendekatan dampak yang digunakan adalah CML v4.8 2016. Hasil penelitian menunjukkan kategori dampak yang timbul adalah *climate change* sebesar $1,11978 \times 10^{-9}$ Pt dengan *hotspot* yaitu unit reservoir sebesar $5,72134 \times 10^8$ kgCO₂eq, *eutrophication* sebesar $7,30363 \times 10^4$ Pt dengan *hotspot* yaitu unit sedimentasi sebesar 13.070,6 kgPO₄eq, dan *photochemical oxidant formation* sebesar 55,47133 Pt dengan *hotspot* yaitu unit desinfeksi sebesar 4,86292 kg ethylene-eq. Langkah mitigasi yang untuk meminimalisir dampak negatif *climate change* yaitu dengan pemanfaatan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) sebagai sumber energi listrik ramah lingkungan. Langkah mitigasi dampak *eutrophication* adalah dengan menambahkan feri-sulfat, pemanfaatan teknologi sistem bioelektrokimia (BES), dan bioreaktor membran osmotik (OMBR). Langkah mitigasi kategori dampak *photochemical oxidant formation* adalah penggunaan desinfektan alternatif seperti kloramin, peningkatan koagulasi, penggunaan alat prediksi berbasis komputer, dan *pre-treatment* elektrodialisis yang dilanjut dengan iradiasi vakum UV (VUV).

Kata Kunci: Air Bersih, Dampak Lingkungan, IPA, *Life Cycle Assessment*

1. Pendahuluan

Air bersih yang dihasilkan berasal dari air baku yang telah melewati proses pengolahan sesuai dengan baku mutu yang berlaku, meliputi baku mutu kualitas fisik, kimia, biologi, dan radiologi hingga menjadi air bersih yang digunakan oleh masyarakat dalam kehidupan sehari-hari [1]. Proses pengolahan air baku menjadi air bersih membutuhkan beberapa unit produksi yang disesuaikan dengan kualitas air baku yang digunakan. Unit-unit produksi tersebut disebut sebagai Instalasi Pengolahan Air Bersih (IPAB). Pengoperasian unit-unit produksi membutuhkan alat dan bahan agar air bersih yang dihasilkan dalam kualitas yang baik yang melibatkan bahan kimia dan energi listrik dalam setiap proses.

Permasalahan utama yang menjadi faktor utama untuk ditinjau dari proses pengolahan air di IPA Unit 1 Cendana ialah penggunaan bahan kimia, penggunaan energi listrik yang tinggi, dan juga endapan lumpur hasil pengolahan yang tidak diolah. Bahan kimia yang digunakan pada pengolahan air di IPA Unit 1 Cendana antara lain tawas (sebagai koagulan pada proses koagulasi), *soda ash* untuk menetralkan air, dan kaporit (klor) untuk membunuh patogen air pengolahan sebelum masuk ke reservoir dan didistribusikan ke masyarakat. Penggunaan energi listrik pada pengolahan air bersih di IPA Unit 1 Cendana mencapai angka $\pm 1.238.460$ kWh per bulan dengan total unit pengolahan sebanyak 9 unit (*intake*, aerasi, koagulasi, flokulasi, sedimentasi,



filtrasi, desinfeksi, reservoir, dan unit *chemical feeding*), dan proses *backwash filter*. Sumber energi listrik yang digunakan berasal dari PLN (Perusahaan Listrik Negara) yang sebagian besar masih bergantung pada bahan bakar fosil. Buangan lumpur yang dihasilkan IPA Unit 1 Cendana dihasilkan dari unit sedimentasi dan proses *backwash filter*.

Kebutuhan bahan kimia dan energi listrik meningkat seiring dengan jumlah air baku yang keruh dan jarak yang harus ditempuh untuk mengambil air, sehingga meningkatkan dampak negatif ke lingkungan. Semakin banyak air baku yang tersedia dan semakin keruh air tersebut, serta semakin jauh jarak tempuh pengambilan air, maka semakin banyak bahan kimia dan energi listrik yang dibutuhkan, yang memicu peningkatan dampak negatif ke lingkungan secara keseluruhan [2]. Pembuangan lumpur tanpa *treatment* terlebih dahulu akan berdampak negatif terhadap pencemaran lingkungan dan kerusakan ekosistem. Analisis dampak negatif suatu kegiatan ke lingkungan dapat dihitung menggunakan beberapa pendekatan, salah satunya yaitu menggunakan metode *Life Cycle Assessment* (LCA).

Berdasarkan penelitian terdahulu yang dilakukan di IPA Gedek PT. Air Bersih Jatim, didapatkan hasil bahwa terdapat 3 (tiga) hal yang berdampak negatif akibat proses produksi pengolahan air bersih, yaitu *global warming*, *freshwater aquatic ecotoxicity*, dan *human toxicity* dengan nilai kategori masing-masing ialah $9,17 \times 10^6$ kgCO₂ eq, $6,6 \times 10^6$ kg 1,4-DB eq, dan $4,56 \times 10^6$ kg 1,4-DB eq [3]. Kategori dampak yang timbul dari kegiatan pengolahan air bersih di IPA Gedek PT. Air Bersih Jatim dengan nilai yang paling besar berasal dari kebutuhan energi listrik yang sangat tinggi, sehingga terbentuknya emisi CO₂ yang berdampak buruk sebagai penyumbang zat pemicu *global warming*. Hasil analisis dampak lingkungan menggunakan pendekatan *Life Cycle Assessment* (LCA) digunakan sebagai dasar acuan untuk dapat memberikan rekomendasi terhadap kegiatan yang sedang dianalisis [3].

Oleh karena itu, analisis dampak lingkungan pada pengolahan air bersih penting dilakukan agar dapat mengetahui besaran dampak lingkungan yang dihasilkan dari pengolahan air bersih. Berdasarkan latar belakang penelitian tersebut, maka dilakukan penelitian tentang analisis dampak lingkungan pada proses pengolahan air bersih untuk dapat mengetahui tingkat dampak lingkungan yang dihasilkan dari proses produksi pengolahan air bersih di IPA Unit 1 Cendana menggunakan metode *Life Cycle Assessment* (LCA) “*Gate To Gate*” yang hanya fokus pada tahap produksi.

2. Metode Penelitian

Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan dari bulan Juni 2024 sampai Mei 2025 terhitung sejak tahap persiapan studi literatur, survei lapangan, persiapan alat dan bahan, pengumpulan data, pengolahan data serta penyusunan laporan penelitian. Penelitian dilakukan di Instalasi Pengolahan Air (IPA) 1 Unit Cendana, Perumdum Tirta Kencana Samarinda, Jalan Cendana, Kelurahan Karang Anyar, Kecamatan Sungai Kunjang, Kota Samarinda, Kalimantan Timur.

Perangkat Penunjang Penelitian

Penelitian ini memerlukan perangkat penunjang agar penelitian dapat terlaksana dengan baik. Perangkat penunjang penelitian yang digunakan pada penelitian ini antara lain Laptop dengan spesifikasi 64bit dan RAM 4GB/256SSD Windows 10, *Software* OpenLCA 2.3.1, *Microsoft Word* 2019, dan *Microsoft Excel* 2019.

Pengumpulan Data

Tahap pengumpulan data pada penelitian kali ini yaitu dengan melakukan inventarisasi data. Inventarisasi data tersebut mencakup tahapan proses pengolahan air dan kebutuhan data *input* dan *output* setiap unit pengolahan di IPA Unit 1 Cendana. Inventarisasi data tersebut dibagi menjadi 2 (dua) jenis data, yaitu data primer dan data sekunder. Data sekunder tersebut antara lain data bahan-bahan kimia yang dibutuhkan, data endapan lumpur yang dihasilkan, serta rata-rata penggunaan listrik di IPA tersebut pada tahun 2024. Data-data sekunder tersebut kemudian akan diolah menjadi data primer untuk dapat mengetahui energi listrik yang



dihasilkan setiap unit pengolahan dan emisi yang dihasilkan. Data-data yang telah dikumpulkan akan digunakan sebagai acuan dalam menentukan *input* dan *output* dari masing-masing kegiatan pengolahan air di IPA Unit 1 Cendana serta menjadi sumber data acuan untuk perhitungan emisi, Data yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Pengumpulan Kebutuhan Data & Energi IPA Unit 1 Cendana

No.	Tahapan Proses	Kebutuhan Data		Sumber
		<i>Input</i>	<i>Output</i>	
1.	<i>Intake</i>	a. Debit air baku b. Energi listrik	a. Air hasil pengolahan b. Emisi energi listrik yang dihasilkan	Data dari arsip/laporan IPA Unit 1 Cendana dan Perhitungan IPCC untuk menghitung jumlah emisi yang dihasilkan
2.	Aerasi	a. Debit air baku yang masuk b. Energi listrik	a. Air hasil pengolahan b. Emisi energi listrik yang digunakan	Data dari arsip/laporan IPA Unit 1 Cendana Perumdam Tirta Kencana Samarinda dan Perhitungan IPCC untuk menghitung jumlah emisi yang dihasilkan
3.	Koagulasi	a. <i>Effluent</i> unit sebelumnya b. Debit air hasil pengolahan yang masuk c. Penambahan tawas ($Al_2(SO)_4$)	a. Air hasil pengolahan	Data dari arsip/laporan IPA Unit 1 Cendana Perumdam Tirta Kencana Samarinda
4.	Flokulasi	a. <i>Effluent</i> unit sebelumnya b. Debit air hasil pengolahan yang masuk	a. Air hasil pengolahan	Data dari arsip/laporan IPA Unit 1 Cendana Perumdam Tirta Kencana Samarinda
5.	Sedimentasi	a. <i>Effluent</i> unit sebelumnya b. Debit air hasil pengolahan yang masuk	a. Air hasil pengolahan b. Endapan <i>sludge</i>	Data dari arsip/laporan IPA Unit 1 Cendana Perumdam Tirta Kencana Samarinda
6.	Filtrasi	a. <i>Effluent</i> unit sebelumnya b. Debit air hasil pengolahan yang masuk c. Energi listrik d. Pasir silika	a. Air hasil pengolahan b. Buangan media (pasir silika) c. Emisi energi listrik yang digunakan	Data dari arsip/laporan IPA Unit 1 Cendana Perumdam Tirta Kencana Samarinda dan Perhitungan IPCC untuk menghitung jumlah emisi yang dihasilkan
7.	<i>Backwash filter</i>	a. Debit air pencucian <i>backwash</i> b. Energi listrik	a. Air hasil pengolahan b. Air <i>recycle backwash</i> c. Emisi energi listrik yang digunakan d. Endapan <i>sludge</i>	Data dari arsip/laporan IPA Unit 1 Cendana Perumdam Tirta Kencana Samarinda dan Perhitungan IPCC untuk menghitung jumlah emisi yang dihasilkan
8.	Desinfeksi	a. <i>Effluent</i> unit sebelumnya b. Debit air hasil pengolahan yang masuk c. Energi listrik	a. Air hasil pengolahan b. Data kualitas air produk c. Emisi energi listrik yang digunakan	Data dari arsip/laporan IPA Unit 1 Cendana Perumdam Tirta Kencana Samarinda dan Perhitungan IPCC untuk menghitung jumlah emisi yang dihasilkan



No.	Tahapan Proses	Kebutuhan Data		Sumber
		Input	Output	
		d. Penambahan soda ash (Na_2CO_3) e. Penambahan kaporit ($\text{Ca}(\text{ClO})_2$)		
9.	Reservoir	a. Debit air hasil pengolahan yang masuk b. Energi Listrik c. Data kualitas air produksi	a. Air hasil pengolahan b. Emisi energi listrik yang digunakan	Data dari arsip/laporan IPA Unit 1 Cendana Perumdam Tirta Kencana Samarinda dan Perhitungan IPCC untuk menghitung jumlah emisi yang dihasilkan
10.	Chemical Feeding	a. Air dari reservoir sebagai pelarut bahan kimia b. Tawas c. Kaporit d. Soda Ash e. Energi Listrik	a. Bahan kimia terlarut ke unit-unit pengolahan sesuai dengan peruntukannya b. Emisi energi listrik yang digunakan	Data dari arsip/laporan IPA Unit 1 Cendana Perumdam Tirta Kencana Samarinda dan Perhitungan IPCC untuk menghitung jumlah emisi yang dihasilkan

Analisis Life Cycle Assessment menggunakan OpenLCA 2.3.1

Hasil dari pengumpulan data pada Tabel 1 akan dilanjutkan ke analisis data menggunakan bantuan *Software* OpenLCA 2.3.1, dengan tahapan yang dilakukan yaitu Penentuan *goal* dan *scope*, *Life Cycle Inventory* (LCI), *Life Cycle Impact Assessment* (LCIA), dan Interpretasi (*Interpretation*). Berdasarkan tahapan-tahapan tersebut, akan diketahui kategori dampak lingkungan yang timbul dan *hotspot* yang menyebabkan kategori dampak tersebut timbul dengan bobot atau skor tertinggi dari kegiatan pengolahan air bersih di IPA Unit 1 Cendana.

3. Hasil dan Pembahasan

Hasil Inventarisasi Data Unit Pengolahan Air Bersih IPA Unit 1 Cendana

Data yang didapatkan yakni *input*, *output*, dan *waste* pada masing-masing unit pengolahan air akan dikumpulkan membentuk suatu inventaris yang disebut sebagai tahap *Life Cycle Inventory*. Berdasarkan sistem batasan (*boundaries*) yang ditentukan, terdapat 10 tahapan analisis LCA sesuai dengan unit pengolahan air, yakni *intake*, aerasi, koagulasi, flokulasi, sedimentasi, filtrasi, desinfeksi, reservoir, *backwash filter*, dan *chemical feeding*. Semua data yang dikumpulkan telah disesuaikan sesuai dengan proses yang terjadi selama satu bulan secara umum, antara lain yaitu data debit air pada masing-masing unit pengolahan, data penggunaan bahan kimia, data endapan lumpur, data penggunaan listrik, dan perhitungan emisi.

Perhitungan emisi dilakukan untuk mengetahui seberapa besar jumlah gas penyebab Gas Rumah Kaca (GRK) yang dihasilkan dari suatu kegiatan, yakni CO_2 , CH_4 , dan N_2O . Perhitungan emisi gas rumah kaca pada penelitian menggunakan panduan perhitungan emisi yang dikembangkan oleh IPCC. Hasil perhitungan emisi gas rumah kaca dinyatakan dalam satuan kgCO_2eq yang menggunakan nilai faktor emisi dalam perhitungan atau yang biasa disebut sebagai nilai GWP (*Global Warming Potential*). Nilai faktor emisi dalam perhitungan kali ini berasal dari [4]. Data emisi selain CO_2 dikonversikan menjadi emisi CO_2 ekuivalen dengan nilai GWP sebagai pembanding. Pada perhitungan yang digunakan juga dibutuhkan nilai faktor emisi masing-masing gas rumah kaca. Data faktor emisi tersebut berasal dari Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral tahun 2019 [5] yang masih menggunakan acuan faktor emisi dari *Ecometrica* [6].

Hasil perhitungan emisi CO_2 didapatkan dengan mengalikan konsumsi energi (rata-rata kWh per bulan) dengan faktor emisi CO_2 yaitu sebesar 0,774388897 [6]. Hasil perhitungan emisi CH_4 didapatkan dengan mengalikan konsumsi energi (rata-rata kWh per bulan) dengan faktor emisi CH_4 yaitu sebesar 0,00001594341 [6], dan nilai GWP (*Global Warming Potential*) CH_4 yaitu sebesar 30 [4]. Hasil perhitungan emisi N_2O



didapatkan dengan mengalikan konsumsi energi (rata-rata kWh per bulan) dengan faktor emisi N₂O yaitu sebesar 0,00000876813 [6] dan nilai GWP (*Global Warming Potential*) N₂O yaitu sebesar 273 [4].

Seluruh data yang telah dikumpulkan dari masing-masing unit pengolahan air di IPA Unit 1 Cendana akan membentuk suatu *inventory* yang selanjutnya akan dianalisis dengan bantuan *software* OpenLCA 2.3.1. Hasil inventarisasi data pengolahan air IPA Unit Cendana dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Inventarisasi Data IPA Unit 1 Cendana

<i>Inventory</i>	Jumlah (rata-rata per bulan)	Satuan
Intake (Air Sungai Mahakam)		
Input		
Air Baku Sungai Mahakam	829.440	Ton
Energi		
Listrik	449.523	kW
Output (Produk)		
Air	829.440	Ton
Waste		
Emisi CO ₂	348.105,6201	kgCO ₂ eq
Emisi CH ₄	215,0078848	kgCO ₂ eq
Emisi N ₂ O	1.076,022976	kgCO ₂ eq
Aerasi		
Input		
Air dari Intake	829.440	Ton
Energi		
Listrik	198.477	kW
Output (Produk)		
Air	829.440	Ton
Waste		
Emisi CO ₂	153.698,3851	kgCO ₂ eq
Emisi CH ₄	94,9320056	kgCO ₂ eq
Emisi N ₂ O	475,0942937	kgCO ₂ eq
Koagulasi		
Input		
Air dari Aerasi	829.440	Ton
Tawas	32.000	kg
Energi		
Listrik	-	kW
Output (Produk)		
Air	829.440	Ton
Waste		
Emisi CO ₂	-	kgCO ₂ eq
Emisi CH ₄	-	kgCO ₂ eq
Emisi N ₂ O	-	kgCO ₂ eq
Flokulasi		
Input		
Air dari Koagulasi	829.440	Ton
Energi		
Listrik	-	kW



<i>Inventory</i>	<i>Jumlah (rata-rata per bulan)</i>	<i>Satuan</i>
Output (Produk)		
Air	Air	Air
Waste		
Emisi CO ₂	Emisi CO ₂	Emisi CO ₂
Emisi CH ₄	-	kgCO ₂ eq
Emisi N ₂ O	-	kgCO ₂ eq
Sedimentasi		
Input		
Air dari Flokulasi	829.440	Ton
Energi		
Listrik	-	kW
Output (Produk)		
Air	759.456	Ton
Waste		
Sludge	67,94	m ³
Emisi CO ₂	-	kgCO ₂ eq
Emisi CH ₄	-	kgCO ₂ eq
Emisi N ₂ O	-	kgCO ₂ eq
Filtrasi		
Input		
Air dari Sedimentasi	759.456	Ton
Pasir Silika	409.600	kg
Air dari Reservoir (untuk Backwash Filter)	259.200	Ton
Energi		
Listrik	21.600	kW
Output (Produk)		
Air	751.680	Ton
Waste		
Sludge (Backwash Filter)	4,26	m ³
Air Backwash Filter	259.200	Ton
Emisi CO ₂	16.726,80018	kgCO ₂ eq
Emisi CH ₄	10,33132968	kgCO ₂ eq
Emisi N ₂ O	51,70390898	kgCO ₂ eq
Desinfeksi		
Input		
Air dari Filtrasi	751.680	Ton
Kaporit	32.000	kg
Soda Ash	5.890	Kg
Energi		
Listrik	7.200	kW
Output (Produk)		
Air	751.680	Ton
Waste		
Emisi CO ₂	5.575,600058	kgCO ₂ eq
Emisi CH ₄	3,44377656	kgCO ₂ eq
Emisi N ₂ O	17,23463633	kgCO ₂ eq
Reservoir		
Input		
Air dari Desinfeksi	751.680	Ton



<i>Inventory</i>	<i>Jumlah (rata-rata per bulan)</i>	<i>Satuan</i>
Energi		
Listrik	546.480	kW
Output (Produk)		
Air (Distribusi)	751.680	Ton
Air (<i>Backwash Filter</i>)	259.200	Ton
Pelarut (<i>Chemical Feeding</i>)	29.173	liter
Waste		
Emisi CO ₂	423.188,0444	kgCO ₂ eq
Reservoir		
Input		
Air dari Desinfeksi	751.680	Ton
Energi		
Listrik	546.480	kW
Output (Produk)		
Air (Distribusi)	751.680	Ton
Air (<i>Backwash Filter</i>)	259.200	Ton
Pelarut (<i>Chemical Feeding</i>)	29.173	liter
Waste		
Emisi CO ₂	423.188,0444	kgCO ₂ eq
Emisi CH ₄	261,3826409	kgCO ₂ eq
Emisi N ₂ O	17,23463633	kgCO ₂ eq
Chemical Feeding		
Input		
Air dari Reservoir	29.173	Liter
Tawas	32.000	kg
Kaporit	3.290	kg
Soda Ash	5.890	kg
Energi		
Listrik	6.300	kW
Output (Produk)		
Larutan Tawas (Koagulasi)	24.615,38	Liter
Larutan Kaporit (Desinfeksi)	1.400	Liter
Larutan Soda Ash (Desinfeksi)	2.356	Liter
Waste		
Emisi CO ₂	4.878,650051	kgCO ₂ eq
Emisi CH ₄	3,01330449	kgCO ₂ eq
Emisi N ₂ O	15,08030679	kgCO ₂ eq

Hasil Life Cycle Impact Assessment Unit Pengolahan Air Bersih IPA Unit 1 Cendana

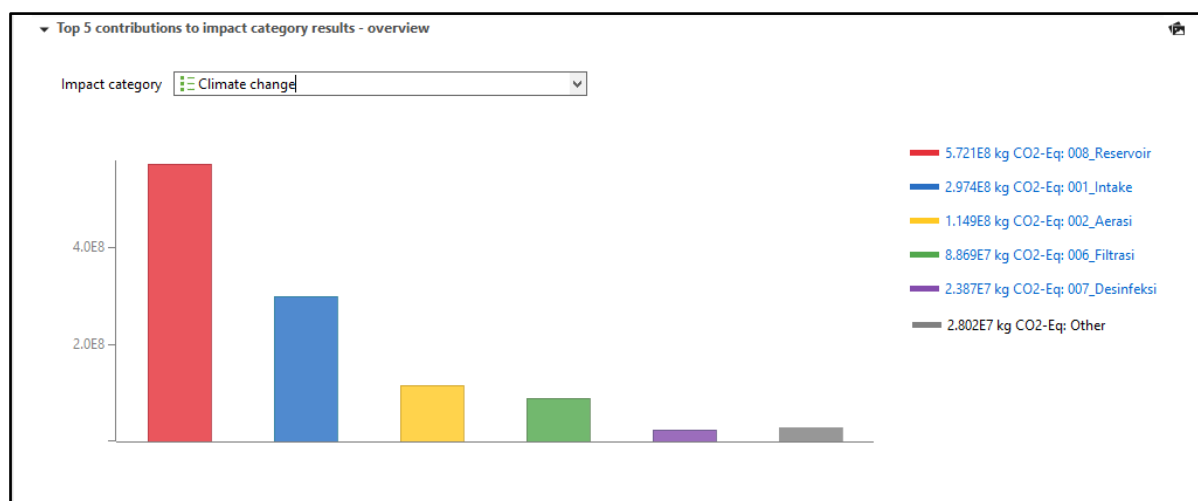
Setelah melalui tahap *Life Cycle Inventory* (LCI), data unit pengolahan air yang telah dimasukkan ke *software* OpenLCA 2.3.1 akan dianalisis dengan metode pendekatan CML v4.8 2016 yang tersedia. Tahapan *Life Cycle Impact Assessment* dilakukan dengan 4 (empat) tahapan, yaitu *characterization*, *normalization*, *weighting*, dan *single score*.

Characterization

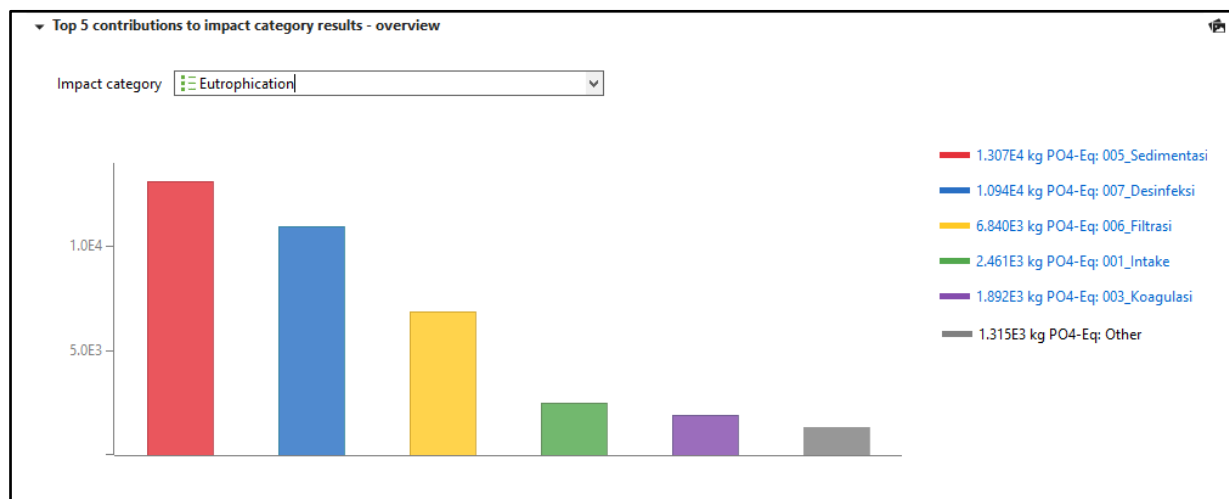
Setiap proses *input* dan *output* dimasukkan ke dalam *software* Open LCA 2.3.1, maka nilai dampak yang tampil dari tahap ini ditentukan dengan menggunakan *database* dan metode perhitungan yang tersedia. Pada tahap *characterization*, kontribusi setiap unit terhadap setiap kategori dampak akan terlihat dan akan menunjukkan unit yang berkontribusi besar yang disebut sebagai *hotspot*. Setiap kategori dampak yang



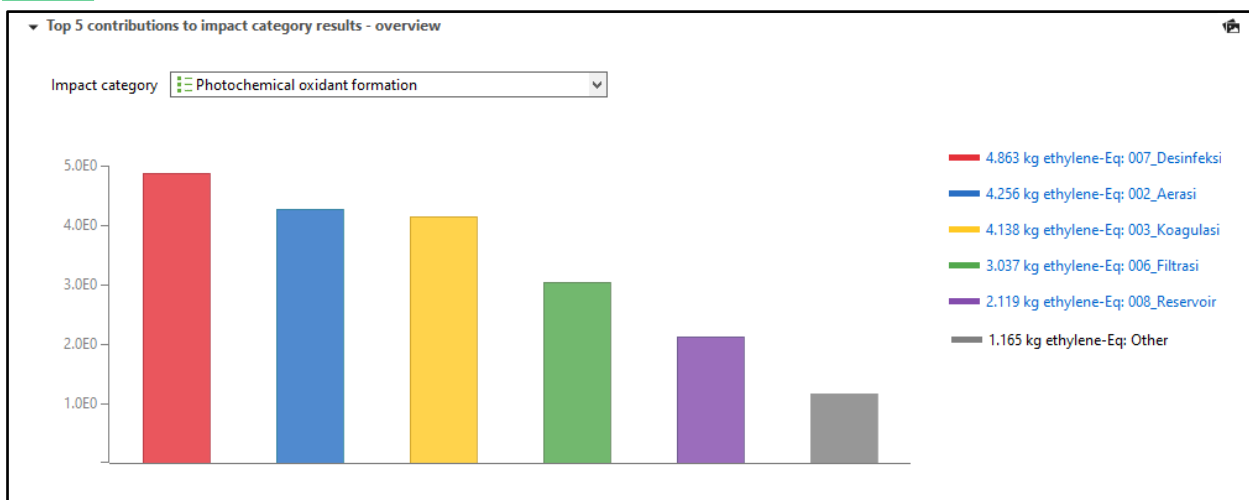
dihasilkan memiliki unit yang berbeda pada tahap karakterisasi [7]. Berdasarkan hasil penelitian, kategori dampak yang timbul dari kegiatan pengolahan air IPA Unit 1 Cendana adalah *climate change*, *eutrophication*, dan *photochemical oxidant formation*. Unit yang menjadi kontributor terbesar pada kategori dampak *climate change* adalah reservoir yang ditunjukkan pada Gambar 1 dengan nilai sebesar $5,721 \times 10^8$ kgCO₂eq, unit yang menjadi kontributor terbesar pada kategori dampak *eutrophication* adalah sedimentasi yang ditunjukkan pada Gambar 2 dengan nilai sebesar $1,307 \times 10^4$ kgPO₄eq, dan unit yang menjadi contributor terbesar pada kategori dampak *photochemical oxidant formation* adalah desinfeksi yang ditunjukkan pada Gambar 3 dengan nilai sebesar 4,863 kg *ethylene-eq*.



Gambar 1. Hasil *Characterization* Kategori Dampak ‘Climate Change’



Gambar 2. Hasil *Characterization* Kategori Dampak ‘Eutrophication’



Gambar 3. Hasil *Characterization* Kategori Dampak ‘Photochemical Oxidant Formation’

Impact Analysis

Setiap unit pengolahan menghasilkan dampak ke lingkungan berdasarkan *input* dan *output* yang telah dimasukkan ke dalam OpenLCA 2.3.1. Pada tahap *normalization* hanya menunjukkan nilai, sedangkan tahap *impact analysis* menjelaskan substansi atau proses yang menghasilkan nilai tertinggi yang mempengaruhi nilai dampak. Oleh karena itu, terdapat perbedaan nilai antara normalisasi dan pembobotan pada tahap analisis dampak. Selain itu, beberapa faktor dampak dalam analisis dampak memiliki nilai yang berbeda dengan faktor normalisasi. *Impact analysis* yang dihasilkan oleh kegiatan pengolahan air di IPA Unit 1 Cendana dapat dilihat pada Tabel 3 dan hasil *normalization*, *weighting*, dan *single score* ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 3. Hasil *Impact Analysis* OpenLCA 2.3.1

No.	Impact Category	Score	Unit
1.	Acidification	0	kgSO ₂ eq
2.	Climate Change	1,11978 × 10 ⁹	kgCO ₂ eq
3.	Ecotoxicity: freshwater	0	kg1,4DCBeq
4.	Ecotoxicity: marine	0	kg1,4DCBeq
5.	Ecotoxicity: terrestrial	0	kg1,4DCBeq
6.	Energy resources: non-renewable	0	MJ
7.	Eutrophication	3,65181 × 10 ⁴	kgPO ₄ eq
8.	Human Toxicity	0	kg1,4DCBeq
9.	Material resources: metals/minerals	0	KgSbeq
10.	Ozone depletion	0	kgCFC ₁₁ eq
11.	Photochemical oxidant formation	19,57812	kg ethylene-eq

Tabel 4. Hasil *Normalization* & *Single Score* OpenLCA 2.3.1

Normalization		
Impact Category	Amount	Unit
Acidification	0	Pt
Climate Change	1,11978 × 10 ⁹	Pt
Ecotoxicity: freshwater	0	Pt



<i>Normalization</i>		
<i>Impact Category</i>	<i>Amount</i>	<i>Unit</i>
<i>Ecotoxicity: marine</i>	0	Pt
<i>Ecotoxicity: terrestrial</i>	0	Pt
<i>Energy resources: non-renewable</i>	0	Pt
<i>Eutrophication</i>	$7,30363 \times 10^4$	Pt
<i>Human Toxicity</i>	0	Pt
<i>Material resources: metals/minerals</i>	0	Pt
<i>Ozone depletion</i>	0	Pt
<i>Photochemical oxidant formation</i>	65,26039	Pt
<i>Single Score</i>		
<i>Impact Category</i>	<i>Amount</i>	<i>Unit</i>
<i>Acidification</i>	0	Pt
<i>Climate Change</i>	$1,11978 \times 10^9$	Pt
<i>Ecotoxicity: freshwater</i>	0	Pt
<i>Ecotoxicity: marine</i>	0	Pt
<i>Ecotoxicity: terrestrial</i>	0	Pt
<i>Energy resources: non-renewable</i>	0	Pt
<i>Eutrophication</i>	$7,30363 \times 10^4$	Pt
<i>Human Toxicity</i>	0	Pt
<i>Material resources: metals/minerals</i>	0	Pt
<i>Ozone depletion</i>	0	Pt
<i>Photochemical oxidant formation</i>	55,47133	Pt

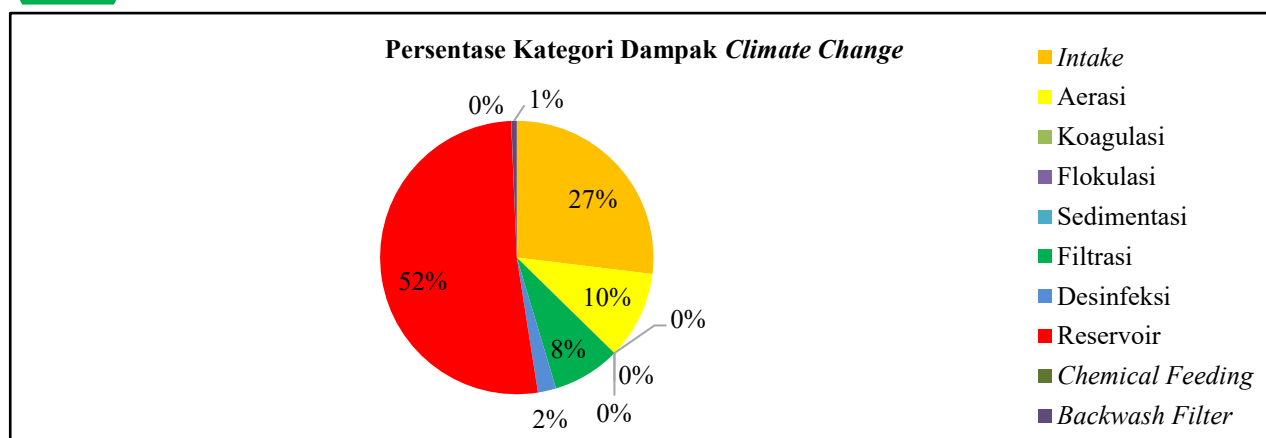
1) *Climate Change*

Climate change atau perubahan iklim disebabkan oleh peningkatan emisi gas rumah kaca yaitu karbon dioksida (CO₂), metana (CH₄), dan dinitrogen monoksida (N₂O) yang ada di atmosfer. Salah satu penyebab peningkatan emisi gas rumah kaca disebabkan oleh suatu kegiatan manusia yang memerlukan energi listrik dalam jumlah yang sangat tinggi dan digunakan secara terus menerus. Peningkatan emisi gas rumah kaca menyebabkan atmosfer bumi dapat menahan panas matahari dan mencegah emisi tersebut keluar dari atmosfer. Hal tersebut mengakibatkan es di kutub mencair, suhu rata-rata dunia meningkat, dan pola cuaca menjadi tidak stabil sehingga mengarah ke perubahan iklim dan pemanasan global [8]. Hasil analisis kategori dampak ‘*climate change*’ unit pengolahan air IPA Unit 1 Cendana pada OpenLCA 2.3.1 dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil Kategori *Climate Change* IPA Unit 1 Cendana

Unit Pengolahan	Score (kgCO₂eq)
<i>Intake</i>	$2,97351 \times 10^8$ (297.351.000)
<i>Aerasi</i>	$1,14879 \times 10^8$ (114.879.000)
<i>Koagulasi</i>	0
<i>Flokulasi</i>	0
<i>Sedimentasi</i>	0
<i>Filtrasi</i>	$8,86889 \times 10^7$ (88.688.900)
<i>Desinfeksi</i>	$2,38667 \times 10^7$ (23.866.700)
<i>Reservoir</i>	$5,72134 \times 10^8$ (572.134.000)
<i>Chemical Feeding</i>	$3,48507 \times 10^5$ (348.507)
<i>Backwash Filter</i>	$7,00161 \times 10^6$ (7.001.610)

=



Gambar 4. Persentase Kategori Dampak '*Climate Change*'

Berdasarkan analisis perhitungan kategori dampak '*climate change*' yang ditunjukkan pada Gambar 4, didapatkan hasil bahwa unit reservoir berkontribusi paling besar terhadap dampak *climate change* dengan nilai sebesar $5,72134 \times 10^8$ kgCO₂eq. Hal ini disebabkan kebutuhan energi listrik pada unit reservoir membutuhkan energi listrik yang sangat tinggi, yaitu sebesar 546.480 kWh/bulan. Reservoir memerlukan konsumsi energi listrik yang besar untuk mengoperasikan pompa-pompa pendistribusian air, sebagai sumber air untuk proses *backwash filter*, serta untuk kebutuhan sistem *chemical feeding* dalam melarutkan bahan-bahan kimia. Energi listrik dalam jumlah yang besar akan menghasilkan emisi gas rumah kaca yang tinggi, sehingga berpotensi menyebabkan perubahan iklim yang mengarah ke potensi terjadinya pemanasan global.

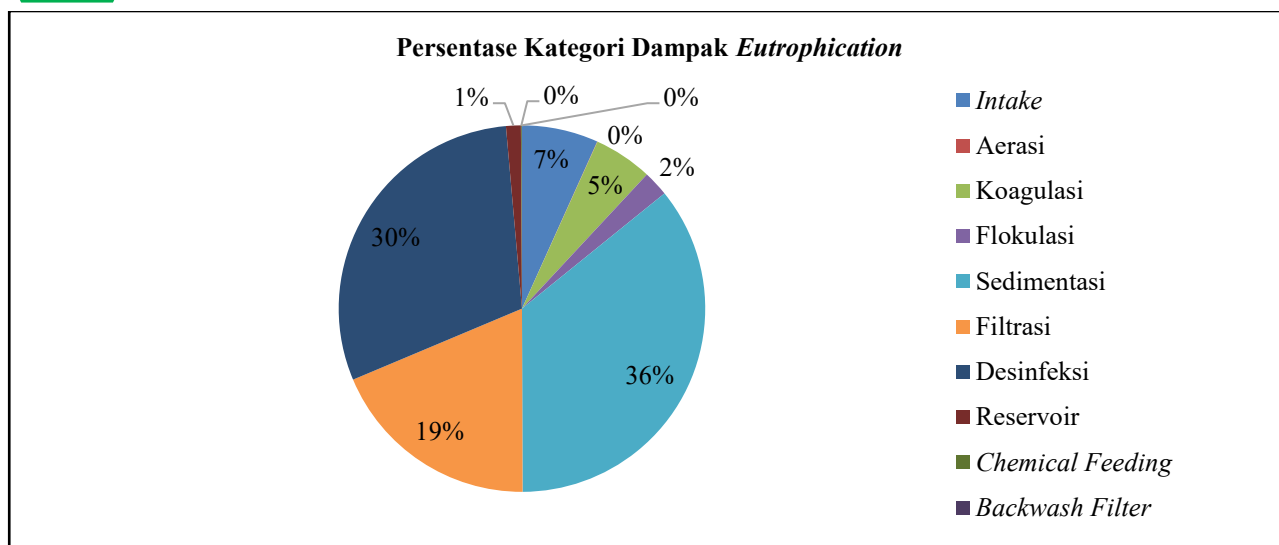
2) *Eutrophication*

Eutrofikasi merupakan salah satu kategori dampak dalam analisis siklus hidup. Peningkatan produktivitas primer ekosistem akuatik yang disebabkan oleh pengayaan nutrisi seperti nitrogen dan fosfor dikenal sebagai eutrofikasi. Pertumbuhan ganggang atau tanaman air yang tidak terkendali merupakan contoh perkembangan abnormal atau *blooming* komponen produsen di dalam air yang dipicu oleh peristiwa eutrofikasi.

Keberadaan zat-zat tertentu di dalam badan air sebagai akibat dari aktivitas manusia tertentu yang tidak ramah lingkungan. Eutrofikasi merupakan salah satu penyebab kerusakan lingkungan dan diklasifikasikan sebagai antropogenik [9]. Hasil analisis kategori dampak '*eutrophication*' unit pengolahan air IPA Unit 1 Cendana pada OpenLCA 2.3.1 dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6. Hasil Kategori *Eutrophication* IPA Unit 1 Cendana

Unit Pengolahan	Score (kgPO ₄ eq)
Intake	2.461,4619
Aerasi	9,58529
Koagulasi	1.891,55944
Flokulasi	819,45209
Sedimentasi	13.070,6
Filtrasi	6.840,39869
Desinfeksi	10.939,2
Reservoir	477,09946
Chemical Feeding	28,24524
Backwash Filter	5,83861



Gambar 5. Persentase Kategori Dampak '*Eutrophication*'

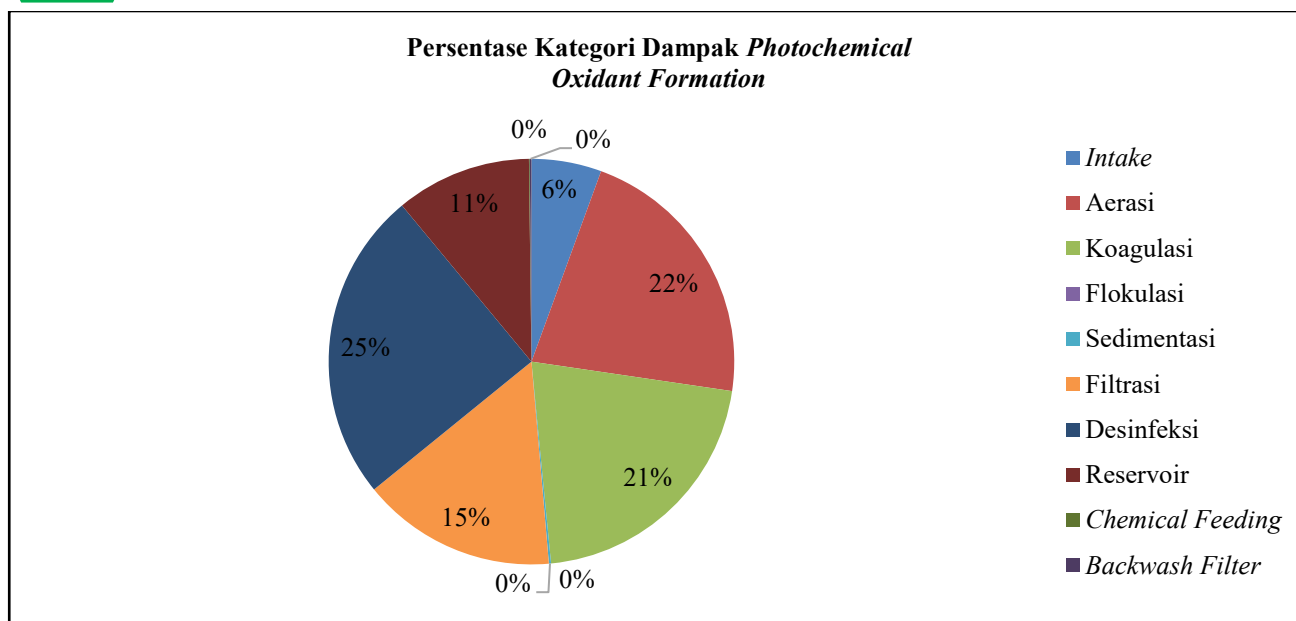
Berdasarkan hasil analisis OpenLCA 2.3.1, pada Gambar 5 ditunjukkan bahwa unit sedimentasi merupakan penyumbang dampak terbesar dalam kategori *eutrophication* dengan nilai sebesar 13.070,6 kgPO₄eq. Sedimentasi menjadi *hotspot* dalam kategori dampak *eutrophication* diduga karena pengendapan material organik dan *nutrient* selama proses koagulasi, flokulasi, serta bawaan dari air baku yang terakumulasi pada unit sedimentasi dan menghasilkan endapan lumpur. Lumpur pada sedimentasi dapat memperburuk dampak eutrofikasi dalam pengolahan air yang disebabkan oleh kandungan fosfor dan nitrogen yang terakumulasi [10]. Penggunaan tawas sebagai koagulan pada unit sebelum sedimentasi hanya mampu mengurangi sebagian fosfor, sehingga masih terdapat residu fosfat yang berpotensi memicu *eutrophication*.

3) *Photochemical Oxidant Formation*

Photochemical Oxidant Formation merupakan salah satu kategori dampak pada analisis siklus hidup. *Photochemical Oxidant Formation* atau pembentukan oksidan fotokimia (kabut fotokimia) terjadi di beberapa atmosfer ketika terdapat polutan yang membentuk polutan. Hal ini terjadi pada udara yang sebanding dengan sinar matahari dan kelembapan rendah, serta adanya nitrogen oksida dan senyawa organik yang mudah menguap [11]. Hasil analisis kategori dampak '*photochemical oxidant formation*' unit pengolahan air IPA Unit 1 Cendana pada OpenLCA 2.3.1 dapat dilihat pada Tabel 7.

Tabel 7. Hasil Kategori *Photochemical Oxidant Formation* IPA Unit 1 Cendana

Unit Pengolahan	Score (kg ethylene-eq)
<i>Intake</i>	1,09298
<i>Aerasi</i>	4,25623
<i>Koagulasi</i>	4,13763
<i>Flokulasi</i>	0
<i>Sedimentasi</i>	0,03372
<i>Filtrasi</i>	3,0374
<i>Desinfeksi</i>	4,86292
<i>Reservoir</i>	2,1185
<i>Chemical Feeding</i>	0,01281
<i>Backwash Filter</i>	0,02593



Gambar 6. Persentase Kategori Dampak '*Photochemical Oxidant Formation*'

Berdasarkan hasil analisis OpenLCA 2.3.1, pada Gambar 6 ditunjukkan bahwa unit desinfeksi merupakan penyumbang dampak terbesar dalam kategori *photochemical oxidant formation* dengan nilai sebesar 4,86292 kg ethylene-eq. Unit desinfeksi sebagai *hotspot* pada kategori *photochemical oxidant formation* diduga karena penggunaan bahan kimia pada proses desinfeksi, yaitu kaporit. Kandungan klorin pada kaporit dapat terlepas ke udara dan dapat berinteraksi dengan senyawa lain di atmosfer dan memicu pembantukan ozon di lapisan troposfer, sehingga berkontribusi terhadap peningkatan dampak *photochemical oxidant formation*. Kandungan klorin berdampak signifikan terhadap pembentukan oksidan fotokimia, terutama ozon [12].

Rekomendasi Alternatif dan Usaha Perbaikan

Hasil interpretasi menunjukkan unit-unit pengolahan yang menjadi kontributor dampak negatif ke lingkungan. Hasil interpretasi ini menjadi acuan dalam memberikan langkah-langkah mitigasi atau rekomendasi alternatif perbaikan berdasarkan hasil penelitian untuk mengurangi dampak negatif ke lingkungan. Rekomendasi alternatif akan difokuskan pada kategori dampak yang timbul dan *hotspot* yang dihasilkan dari analisis LCA selama proses pengolahan air di IPA Unit 1 Cendana.

Alternatif dan Usaha Perbaikan Kategori Dampak '*Climate Change*'

Unit reservoir merupakan *hotspot* dalam kategori *climate change*, namun energi listrik yang digunakan pada reservoir juga digunakan untuk menunjang operasional unit-unit pengolahan air lainnya di IPA Unit 1 Cendana, terkhusus unit-unit pengolahan yang membutuhkan energi listrik. Penerapan alternatif perbaikan untuk menurunkan kontribusi emisi tersebut tidak hanya pada unit reservoir, namun sistem pengolahan air secara keseluruhan.

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) tidak menghasilkan emisi gas rumah kaca dikarenakan nilai faktor emisi panel surya ialah 0 [13]. Sistem pengolahan air dapat menekan jejak karbon dengan mengganti sumber listrik berbahan bakar fosil dengan energi terbarukan. Pemanfaatan energi bersih ini berpotensi mengurangi emisi secara signifikan, bahkan mendekati nol, sehingga dampak lingkungan diminimalisir.



Estimasi jangka waktu pemakaian panel surya ialah 20 – 25 tahun [13]. Berdasarkan estimasi biaya panel surya sebesar Rp 140.065.900,- dan estimasi jangka waktu selama 25 tahun, maka asumsi biaya yang diperlukan ialah sekitar Rp 466.866,-/bulan. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan panel surya memberikan manfaat terhadap penurunan emisi gas rumah kaca sebagai sumber energi ramah lingkungan dengan harga yang jauh relatif lebih murah.

Alternatif dan Usaha Perbaikan Kategori Dampak ‘Eutrophication’

Berdasarkan hasil analisis LCA pada OpenLCA 2.3.1, didapatkan hasil bahwa unit sedimentasi adalah *hotspot* atau kontributor terbesar kategori dampak *eutrophication*. Hal ini diduga disebabkan pengendapan material organik dan *nutrient* selama proses koagulasi, flokulasi, serta bawaan dari air baku yang terakumulasi pada unit sedimentasi dan menghasilkan endapan lumpur.

Pengendalian beban *nutrient* dapat dilakukan dengan berbagai strategi, salah satunya dengan menambahkan feri-sulfat untuk mengendapkan fosfor terlarut [14]. Penambahan feri-sulfat secara signifikan akan mengurangi kadar fosfor dalam air. Strategi lainnya yang dapat dilakukan untuk mengurangi eutrofikasi adalah dengan melakukan pengelolaan aliran air untuk mengurangi limpasan permukaan dan rembesan bawah tanah serta restorasi ekosistem. Kombinasi retensi *nutrient* tersebut dapat mengurangi beban *nutrient* di instalasi pengolahan air sehingga kategori dampak ‘*eutrophication*’ dapat diminimalisir. [14].

Metode pemilihan *nutrient* bukan strategi spesifik untuk dapat mengurangi beban *nutrient* [15]. Pemanfaatan teknologi canggih seperti sistem bioelektrokimia (BES) dan bioreaktor membran osmotik (OMBR) dapat berkontribusi dalam pengelolaan *nutrient* yang lebih efisien pada pengolahan air dengan adaptasi sesuai kondisi setempat. Langkah alternatif perbaikan yang dapat dilakukan lainnya yaitu dengan mengontrol pH selama koagulasi serta pemberian feri sulfat untuk *phosphate removal* mampu menurunkan beban *nutrient* dalam sistem untuk meminimalkan potensi dampak *eutrophication*. [15].

Alternatif dan Usaha Perbaikan Kategori Dampak ‘Photochemical Oxidant Formation’

Berdasarkan hasil analisis LCA pada OpenLCA 2.3.1, didapatkan hasil bahwa unit desinfeksi adalah *hotspot* atau kontributor terbesar kategori dampak *photochemical oxidant formation*. Hal ini diduga karena penggunaan bahan kimia sebagai desinfektan, yaitu kaporit dan soda ash yang menghasilkan klorin. Kandungan klorin pada kaporit dapat meningkatkan potensi pelepasan gas klorin (Cl_2) ke udara bebas. Gas klorin yang terlepas dapat berinteraksi dengan senyawa lain di atmosfer dan memicu pembentukan ozon di lapisan troposfer, sehingga berkontribusi signifikan terhadap peningkatan dampak *photochemical oxidant formation* dan diperlukan mitigasi untuk meminimalisir dampak yang ditimbulkan.

Mitigasi yang dapat dilakukan untuk mengurangi dampak pembentukan oksidan fotokimia akibat penambahan kimia dalam pengolahan air yaitu dengan menggunakan desinfektan alternatif seperti kloramin, peningkatan koagulasi (*enhanced coagulation*) dengan mengatur secara khusus dosis koagulan yang digunakan dan kondisi proses (misalnya pH) untuk dapat memaksimalkan penghilangan bahan organik alami agar dosis koagulan yang digunakan tidak dalam jumlah yang besar, dan proses membran efektif untuk menghilangkan bahan organik alami (*natural organic matter* atau NOM) secara fisik [16]. Penggunaan metode analisis canggih dan alat prediksi berbasis komputer juga dapat membantu dalam menilai dan mengendalikan pembentukan produk transformasi yang bersifat toksik, sehingga menghasilkan proses pengolahan air yang lebih efisien dan aman [17]. Selain itu, solusi efektif untuk mengurangi dampak pembentukan oksidan fotokimia selama proses pengolahan air adalah dengan pendekatan gabungan berupa *pre-treatment* elektrodialisis yang dilanjut dengan iradiasi vakum UV (VUV) [18]. Metode ini dapat memisahkan mikropolutan target, seperti karbamazepin, dari zat-zat pengganggu seperti ion anorganik utama dan bahan organik terlarut. Penggunaan metode ini dapat meningkatkan efisiensi proses oksidasi lanjutan (AOPs) dan kebutuhan energi secara keseluruhan dapat dikurangi, sehingga meminimalkan pembentukan oksidan fotokimia yang tidak diinginkan. [18].



4. Kesimpulan

Berdasarkan analisis yang telah dilakukan menggunakan metode *Life Cycle Assessment* dan bantuan software OpenLCA 2.3.1, didapatkan hasil bahwa kategori dampak yang timbul akibat kegiatan pengolahan air di IPA Unit 1 Cendana ialah *climate change* dengan nilai sebesar $1,11978 \times 10^{-9}$ Pt, *eutrophication* dengan nilai sebesar $7,30363 \times 10^4$ Pt, *photochemical oxidant formation* dengan nilai sebesar 55,47133 Pt, dengan *hotspot* kategori dampak *climate change* adalah unit reservoir dengan nilai sebesar $5,72134 \times 10^8$ kgCO₂eq, *hotspot* kategori dampak *eutrophication* adalah unit sedimentasi dengan nilai sebesar 13.070,6 kgPO₄eq, dan *hotspot* kategori dampak *photochemical oxidant formation* adalah unit desinfeksi dengan nilai sebesar 4,86292 kg ethylene-eq. Langkah mitigasi yang dapat dilakukan untuk meminimalisir dampak negatif *climate change* yaitu dengan pemanfaatan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) sebagai sumber energi listrik ramah lingkungan. Langkah mitigasi dampak *eutrophication* adalah dengan menambahkan feri-sulfat, pemanfaatan teknologi sistem bioelektrokimia (BES), dan bioreaktor membran osmotik (OMBR). Langkah mitigasi kategori dampak *photochemical oxidant formation* yang dapat dilakukan adalah penggunaan desinfektan alternatif seperti kloramin, peningkatan koagulasi, penggunaan alat prediksi berbasis komputer, dan *pre-treatment* elektrodialisis yang dilanjut dengan iradiasi vakum UV (VUV).

Referensi

- [1] E. Walujodjati, S. Permana, H. Nurhuda, A. S. Pratama, dan R. Banowati, “Analisis Kebutuhan dan Ketersediaan Air”, *Jurnal Konstruksi*, vol. 20, no. 1, pp. 183-193, 2022. Tersedia: <https://doi.org/10.33364/konstruksi.v.20-1.1053>
- [2] D. Y. Irawati dan D. Andrian, “Analisa Dampak Lingkungan Pada Instalasi Pengolahan Air Minum (IPAM) dengan Metode *Life Cycle Assessment* (LCA)”, *Jurnal Teknik Industri*, vol. 19, no. 2, pp. 166-177, 2018. Tersedia: <https://doi.org/10.22219/jtiumm.vol19.no2.166-177>
- [3] N. K. Annisaa, Yusrianti, dan S. Nengse, “Perkiraan Potensi Dampak Lingkungan Menggunakan *Life Cycle Assessment* (LCA) pada Pengolahan Air Bersih di IPA Gedek PT. Air Bersih Jatim”, *Jurnal Envirotek*, vol. 14, no. 2, pp. 132-137, 2022. Tersedia: <https://doi.org/10.33005/envirotek.v14i2.32>
- [4] IPCC, “Section 4: Near-Term Responses in a Changing Climate, Climate Change 2023”, *Synthesis Report*, pp. 42-66, 2023. Tersedia: <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- [5] Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, “Inventarisasi Emisi GRK Sektor Energi”, *Pusat Data dan Teknologi Informasi Energi dan Sumber Daya Mineral Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral*, Jakarta Pusat, 2019. Tersedia: <https://www.esdm.go.id/assets/media/content/content-inventarisasi-emisi-gas-rumah-kaca-sektor-energi-tahun-2019.pdf>
- [6] M. Brander, A. Sood, C. Wylie, A. Haughton, dan J. Lovell, “Electricity-specific Emission Factors For Grid Electricity”, *Ecometrica*, pp. 1-22, 2011. Tersedia: https://bravenewclimate.com/files/assets/media/pdf/electricity_factors_paper.pdf
- [7] C. A. Naufal, F. E. Wahyudianto, dan E. P. Kuncoro, “Analisis Potensi Dampak Pencemaran Udara Proses Produksi Gula Dengan Metode *Life Cycle Assessment*”, *Jurnal Envirotek*, vol. 15, no. 1, pp. 53-60, 2023. Tersedia: <https://doi.org/10.33005/envirotek.v15i1.221>
- [8] M. F. Irma dan E. Gusmira, “Kenaikan Suhu Akibat Peningkatan Emisi Gas Rumah Kaca di Indonesia”, *JSSIT: Jurnal Sains dan Sains Terapan*, vol. 2, no. 1, pp. 26-32, 2024. Tersedia: <https://doi.org/10.30631/jssit.v2i1.49>
- [9] M. S. Yusal, A. Hasyim, H. Hastuti, A. Arif, dan R. H. S. Pratomo, “Review Eutrofikasi : Risiko Dalam Kesuburan Lingkungan Perairan dan Upaya Penanggulangannya”, *Jurnal Kesehatan Lingkungan Indonesia*, vol. 24, no. 1, pp. 124-135, 2025. Tersedia: <https://doi.org/10.14710/jkli.67125>
- [10] Y. Yunan, Z. Congcong, L. Xinyu, X. Lin, Z. Hongxiang, dan C. Yongli, “The Correlation between Water Eutrophication and Sediment Pollution in the Process of Black Odors Water Treatment: A Case Study of the Ximing River and Keli River in Nanning, China”, *Springer International Publishing, Environmental Science and Engineering Sustainable Development of Water and Environment*, pp. 191-206, 2022. Tersedia: https://10.1007/978-3-031-07500-1_17



- [11] L. Handayani, “Analisis Dampak Lingkungan PT Refined Bangka Tin dengan Metode *Life Cycle Assessment*”, *Jurnal Enviroasan*, vol. 6, no.2, pp. 5-10, 2023. Tersedia: <https://e-journal.ukri.ac.id/index.php/enviroasan/article/view/3767>
- [12] G. Chen, X. Fan, H. Wang, Y. J. Tham, Z. Lin, X. Ji, L. Xu, B. Hu, dan J. Chen, Chen, G., dkk., “Formation drivers and photochemical effects of ClNO₂ in a coastal city of Southeast China”, *EGUsphere Publishing*, vol 25, no. 14, 2024. Tersedia: <https://doi.org/10.5194/acp-25-7815-2025>
- [13] F. Pijoh, B. D. P. Kusuma, dan L. P. Purba. “Pembangkit Listrik Tenaga Surya untuk Energi Ramah Lingkungan yang Berkelanjutan”, *Jurnal ISEJOU: Industrial & System Engineering Journals*, vol. 2, no. 2, pp. 201-207, 2024. Tersedia: <https://doi.org/10.37477/isejou.v2i2.631>
- [14] L. Ngatia, J. M. Grace III, D. Moriasi, dan R. Taylor, “Phosphorus Eutrophication and Mitigation Strategies”, *IntechOpen*, 2018. Tersedia: <https://doi.org/10.5772/intechopen.79173>
- [15] R. Mamidala, K. E. Velmaiel, S. Chittaluri, V. Manthapuri, K. Naveen, P. RajaSekhar, “Nutrients Recovery in the Water and Wastewater Sector”, *Advances in Science, Technology & Innovation*, pp. 141-154, 2023. Tersedia: https://doi.org/10.1007/978-3-031-18165-8_11
- [16] B. K. Mayer dan D. R. Ryan, “Impact on Disinfection Byproducts Using Advanced Oxidation Processes for Drinking Water Treatment”, *The Handbook of Environmental Chemistry: Springer, Cham*, vol. 67, pp. 345-368, 2017. Tersedia: https://doi.org/10.1007/698_2017_82
- [17] U. V. Gunten, “Oxidation Processes in Water Treatment: Are We on Track?”, *Environmental Science & Technology*, vol. 52, no. 9, pp. 5062-5075, 2018. Tersedia: <https://doi.org/10.1021/ACS.EST.8B00586>
- [18] Y. Dubowski, Y. Alfiya, Y. Gilboa, S. Sabach, dan E. Friedler, “A Combined Approach of Electrodialysis Pretreatment and Vacuum UV for Removing Micropollutants from Natural Waters”, *Water Research*, vol. 251, 2024. Tersedia: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.121152>