



Analisis *Life Cycle Assessment* (LCA) Pada Pengolahan Air Limbah di Pahu Makmur *Palm Oil Mill*

Life Cycle Assessment (LCA) Analysis of Wastewater Treatment at Pahu Makmur *Palm Oil Mill*

M. IBNU ALFARIDHO, DWI ERMAWATI RAHAYU*, EDHI SARWONO

Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Mulawarman.
Jl. Sambaliung No. 9, Kampung Gunung Kelua, Samarinda, Kode Pos 75242, Indonesia
*dwiermarahayu@ft.unmul.ac.id

ARTICLE INFO

Article history:

Received 26 March 2023

Accepted 21 June 2023

Published 31 July 2023

Keywords:

POME

LCA

Global warming

Climate change

Biogas power plants

ABSTRACT

One of the potential wastes generated by the Crude Palm Oil (CPO) production process is Palm Oil Mill Effluent (POME). POME wastewater can produce Greenhouse Gases (GHG) and high levels of organic materials such as COD, BOD, and total nitrogen, which have impacts on the environment. This study aims to analyse the environmental impacts of POME wastewater treatment using the Life Cycle Assessment (LCA) method based on SNI ISO 14040:2016. The LCA analysis was aided by SimaPro v 9.3.0 software using the IMPACT 2002+ calculation method. The research focuses on measuring the environmental impacts of the POME waste treatment process in a 1 ton CPO production unit, with impact categories including global warming, water eutrophication, and respiratory organics. The research limitation is set to "gate to gate" due to the input being limited to the waste treatment process of the production plant. It was found that the environmental impacts generated are as follows: Global warming (8.47E+08 kg CO₂eq/day) with contributions from biogenic CH₄, N₂O, fossil CH₄, and fossil CO₂ emissions; water eutrophication (33,622.8 kg PO₄eq/day) with contributions from COD and total nitrogen emissions; and respiratory organics (253,197.7 kg C₂H₄eq/day) with contributions from biogenic CH₄ emissions. In this case, the sludge pit process has the highest contribution to each impact category, accounting for 37.8%. The high percentage of contribution from the sludge pit to the impact category is known due to the biological process of organic matter decomposition, which generates methane biogas. Therefore, a recommended approach that can be implemented to manage POME waste sustainably is to construct an anaerobic digester to capture the released biogas and utilize it as an energy source for biogas power plants. This action is environmentally, economically, and socially viable.

INFORMASI ARTIKEL

Histori artikel:

Diterima 26 Maret 2023

Disetujui 21 Juni 2023

Diterbitkan 31 Juli 2023

Kata kunci:

POME

LCA

Global warming

Perubahan iklim

PLTBg

ABSTRAK

Salah satu potensi limbah yang dapat dihasilkan oleh proses produksi *Crude Palm Oil* (CPO) adalah *Palm Oil Mill Effluent* (POME). Air limbah POME dapat menghasilkan Gas Rumah Kaca (GRK) dan bahan organik tinggi seperti COD, BOD dan total nitrogen yang berdampak pada lingkungan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dampak lingkungan pada pengolahan air limbah POME menggunakan metode *Life Cycle Assessment* (LCA) berdasarkan SNI ISO 14040:2016. Analisis LCA dibantu *software* SimaPro v 9.3.0 dengan metode perhitungan IMPACT 2002+. Fokus penelitian adalah mengukur dampak lingkungan dari proses pengolahan limbah POME pada unit fungsi produksi 1 ton CPO, dengan kategori dampak meliputi *global warming*, eutrofikasi perairan, dan *respiratory organic*. Batasan penelitian menggunakan *gate to gate*, dikarenakan input hanya pada pengolahan limbah dari proses produksi pabrik. Diperoleh bahwa sumber dampak lingkungan yang dihasilkan yaitu *global warming* (8,47E+08 kg CO₂eq/hari) dengan kontribusi emisi CH₄ biogenik, N₂O, CH₄ fosil dan CO₂ fosil. Dampak kedua yaitu eutrofikasi perairan (33.622,8 kg PO₄eq/hari) dengan kontribusi emisi COD dan total nitrogen. Dampak ketiga *respiratory organic* (253.197,7 kg C₂H₄eq/hari) dengan kontribusi emisi CH₄ biogenik. Dalam hal ini proses *sludge pit* berkontribusi tertinggi pada setiap kategori dampak yaitu sebesar 37,8%. Tingginya persentase kontribusi *sludge pit* terhadap kategori dampak diketahui karena adanya proses penguraian bahan organik secara biologis yang menghasilkan biogas metana. Oleh sebab itu, rekomendasi yang dapat diterapkan dengan mengelola limbah POME secara berkelanjutan, yakni membuat *digester* anaerobik untuk dapat menangkap biogas yang terlepas ke udara dan dimanfaatkan menjadi material energi Pembangkit Listrik Tenaga Biogas (PLTBg). Tindakan ini layak secara lingkungan, ekonomi dan sosial.

1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Palm Oil Mill Effluent atau POME adalah zat cair yang dihasilkan dari proses pembuatan *Crude Palm Oil* (CPO) dari kelapa sawit. POME memiliki sifat cairan yang kental dan berwarna kecokelatan, dengan kandungan air mencapai 95%–96%, kandungan minyak sekitar 0,6%–0,7%, dan total padatan sekitar 4%–5%, yang terutama terdiri dari puing-puing buah. POME juga dikenal karena memiliki kandungan BOD dan COD yang sangat tinggi, dengan nilai COD yang sering melebihi 80.000 mg/L (Ilmannafian *et al.*, 2020). Beberapa sumber dari POME meliputi air kondensat dari proses perebusan, air cucian pabrik, air limbah dari proses pemisahan *sludge*, dan buangan dari *hydrocyclone* pada stasiun inti. Setiap ton pengolahan Tandan Buah Segar (TBS) dapat menghasilkan POME sekitar 0,6–1,0 m³ (Nugroho, 2019). POME merupakan suatu proses hilir dalam produksi CPO di industri kelapa sawit. Hal ini dikarenakan POME adalah hasil akhir dari proses produksi pabrik yang dapat berdampak pada lingkungan sehingga perlu dilakukan pengolahan limbah secara efektif.

Salah satu cara mengelola POME untuk mengurangi dampak lingkungannya adalah dengan membuat Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL). Limbah POME didominasi komponen bahan organik yang tinggi sehingga IPAL tersebut dapat dijalankan secara efektif dengan metode *biological ponding system*. Metode ini merupakan pengolahan limbah POME dengan melibatkan aktivitas mikroorganisme untuk menguraikan senyawa-senyawa organik. Pengolahan limbah ini terdiri dari 4 kolam yaitu *acidification pond*, *anaerobic pond*, *aerobic pond* dan *facultative pond*. Apabila telah melewati semua kolam, selanjutnya akan dialirkan ke *land application* dengan memanfaatkan POME dari hasil produksi kelapa sawit yang masih mengandung bahan organik sebagai pupuk cair di lahan perkebunan (Nugroho, 2019). Di samping itu, sistem IPAL yang ada di bagian hilir tersebut memiliki kekurangan atau masih belum maksimal dalam mengurangi dampak lingkungan apabila tidak ada pengelolaan berkelanjutan salah satunya dari emisi Gas Rumah Kaca (Rahayu *et al.*, 2015).

Sistem pengolahan air limbah seperti ini berpotensi mengeluarkan biogas ke atmosfer, yang memiliki komposisi utama CH₄ dan CO₂ yang tidak diketahui dan tidak terkontrol jumlahnya (Wu *et al.*, 2010). GRK menyumbang lebih dari 90% dari semua emisi dari pengolahan POME di pabrik kelapa sawit (Rahayu *et al.*, 2015). Emisi biogas-metana akan sebanding dengan tingkat bahan organik di POME. Selain itu, kadar hara dalam bahan organik POME merupakan bagian dari siklus hara yang terjadi secara terus menerus di alam. Pengolahan air limbah yang melalui proses aerobik, fakultatif, dan anaerobik akan melibatkan mikroorganisme dalam proses respirasi-oksidasi-reduksi yang menghasilkan CO₂ dan CH₄ (Putro, 2022). Proses siklus hara ini terjadi pada proses pengolahan air limbah POME tersebut. Walaupun unsur hara seperti nitrogen dari limbah cair ini diperlukan untuk tanah dan tanaman, namun apabila berlebihan dapat menyebabkan dampak lainnya. Salah satu dampaknya yakni eutrofikasi perairan, yang dapat terjadi akibat tingginya kadar bahan organik seperti COD dan total nitrogen (Simbolon, 2016).

Perlu adanya penelitian terkait pengendalian terhadap dampak lingkungan akibat dari pengolahan POME yang minim pengelolaan berkelanjutan. Hal ini dikarenakan output (emisi) yang dihasilkan dari sistem pengolahan limbah yang tidak memadai akan berdampak pada lingkungan. Salah satu cara untuk membantu melakukan tindakan pengendalian tersebut adalah dengan melakukan analisis dampak lingkungan dengan metode *Life Cycle Assessment* (LCA). Berdasarkan SNI ISO 14040:2016, LCA merupakan kompilasi dan evaluasi masukan, keluaran dan dampak lingkungan potensial dari sistem produk di seluruh daur hidupnya. LCA merupakan pendekatan dari hulu ke hilir atau *cradle to grave* untuk menilai suatu sistem produk secara kuantitatif. Sangat banyak manfaat dari LCA baik untuk industri maupun lingkungan, seperti memperoleh hasil produksi yang optimal dan efisien, serta membantu melakukan tindakan perbaikan secara terus menerus sehingga dapat menjaga lingkungan di masa depan.

Studi LCA yang dilakukan pada dua belas pabrik kelapa sawit di Malaysia menunjukkan bahwa kategori dampak *respiratory inorganics* dan *global warming* berasal dari hilir yaitu limbah POME di pabrik. Kedua kategori dampak ini terkait pada parameter emisi udara. Emisi udara utama yaitu dari kolam POME dalam proses digester anaerobik yang menghasilkan biogas. Ketika biogas ditangkap dengan digester anaerobik, dampak perubahan iklim akan berkurang dan yang tersisa adalah dampak dari kegiatan hulu (Subramaniam *et al.*, 2010). Selanjutnya, dilakukan studi LCA di PTPN IV, PPKS Medan untuk membandingkan antara dua skenario, yaitu tanpa menangkap biogas dan dengan menangkap biogas dengan digester anaerobik dari POME sebagai pembangkit listrik. Dari studi ini, dapat disimpulkan bahwa dengan menangkap dan memanfaatkan biogas POME sebagai sumber energi listrik alternatif, potensi emisi GRK yang dapat direduksi hingga 67% (Wijono, 2017). Studi lain juga memperhitungkan bahwa pemanfaatan POME sebagai pupuk akan berpotensi menurunkan emisi GRK yang dihasilkan sebesar 0,015 ton CO₂eq/TBS atau setara dengan 17,03% (Harimurti *et al.*, 2021).

Oleh karena itu, penelitian ini diharapkan dapat berperan sebagai sarana untuk mengevaluasi dampak lingkungan akibat dari proses pengolahan limbah POME, serta sebagai bahan pertimbangan dalam bentuk rekomendasi kepada perusahaan terkait untuk terus menjaga kelestarian lingkungan dengan melakukan perbaikan berkelanjutan

1.2 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dampak lingkungan pada pengolahan air limbah POME menggunakan metode LCA.

2. METODE

Waktu penelitian dilakukan selama lima bulan (Juni–Oktober 2022) meliputi pengumpulan data primer dan sekunder, pengolahan data, dan penyusunan laporan hasil penelitian. Penelitian ini dilakukan di Pahu Makmur Palm Oil Mill (PMPOM), Kecamatan Jempang, Kabupaten Kutai Barat, Kalimantan Timur.

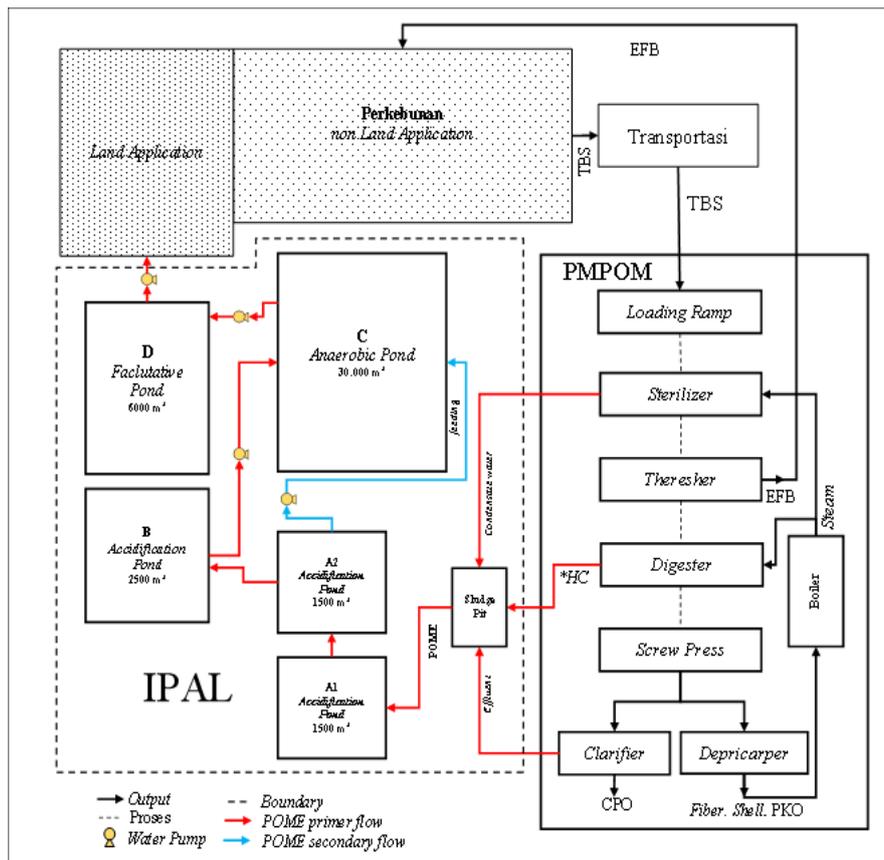
Metode yang digunakan dalam penelitian ini yaitu metode LCA sebagai penilaian dan analisis dampak

lingkungan berdasarkan acuan SNI ISO 14040:2016 dan SNI ISO 14044:2017. Adapun tahapan LCA yaitu *goal and scope*, *Life Cycle Inventory (LCI)*, *Life Cycle Impact Assessment (LCIA)* dan interpretasi. Adapun metode LCA pada penentuan dampak lingkungan untuk pengolahan air limbah POME yaitu IMPACT 2002+. *Software* yang digunakan adalah Simapro versi 9.3.0.

2.1 Penentuan Goal dan Scope

Penelitian ini diharapkan dapat menjadi sarana perusahaan agar dapat mengevaluasi dampak lingkungan akibat dari proses pengolahan limbah POME di IPAL

PMPOM, serta sebagai bahan pertimbangan dalam bentuk rekomendasi kepada perusahaan untuk terus menjaga kelestarian lingkungan dengan melakukan perbaikan berkelanjutan. Ruang lingkup dalam penelitian ini menggunakan *gate to gate*, artinya hanya meninjau kegiatan/aktivitas terdekat yaitu dari inlet IPAL hingga outlet di Pabrik Kelapa Sawit Pahu Makmur. Alasan penggunaan batasan ini dikarenakan input hanya pada pengolahan limbah dari proses produksi pabrik. Unit fungsi yang digunakan pada penelitian ini yaitu produksi 1 ton CPO. Gambar 1 merupakan *boundary sistem* yang terdapat pada PMPOM.



Gambar 1. Boundary system PMPOM

Ada beberapa tahapan proses untuk memproduksi buah sawit menjadi CPO di PMPOM yaitu sebagai berikut: *loading ramp* (penerimaan TBS), *sterilizer* (perebusan TBS), *thresher* (perontokan buah), *digester* (pelumatan buah), *screw press* (ekstraksi minyak) dan klarifikasi (pemurnian minyak). Seperti pada umumnya, PMPOM memiliki produk utama CPO dan produk sampingan berupa kernel, fiber, silo dan tandan buah kosong. Setiap 1 ton CPO yang di produksi oleh pabrik akan menghasilkan 58,1% POME. Adapun sumber POME yang ada di PMPOM terdiri dari tiga komposisi yakni: *condensate water* (35%), *hydrocyclone water* (5%) dan efluen (60%). Setelah mengalami proses di pabrik maka POME akan menuju ke kolam IPAL. Berdasarkan kondisi eksisting, diketahui bahwa IPAL di PMPOM memiliki enam kolam limbah yang meliputi: *sludge pit*, *A1 acidification pond*, *A2 acidification pond*, *B acidification pond*, *anaerobic pond* dan *facultative pond*.

Kolam *sludge pit* merupakan kolam pertama tempat pembuangan limbah dari proses produksi CPO. Kolam ini berfungsi sebagai tempat penampungan limbah cair dari unit proses *sludge separator* dan dari unit proses lainnya. Selanjutnya kolam A1, A2 dan B merupakan unit kolam pengasaman atau *acidification pond*. Kolam ini berfungsi untuk menaikkan kadar *Volatile Fatty Acid (VFA)* dan sebagai kolam pra-kondisi sebelum dialirkan pada kolam *anaerobic pond*. Kolam C sebagai *anaerobic pond* merupakan kolam yang berfungsi sebagai tempat perombakan lebih lanjut dari asam yang mudah menguap menjadi CH₄, CO₂ dan air menggunakan bantuan mikroorganisme. Terakhir, kolam D sebagai *facultative pond* berfungsi sebagai tempat terjadinya proses pemecahan bahan organik limbah cair oleh mikroba yang berasal dari kolam anaerobik berupa pembiakan menjadi senyawa asam-asam organik yang lebih sederhana yang selanjutnya menjadi CH₄, CO₂ dan H₂.

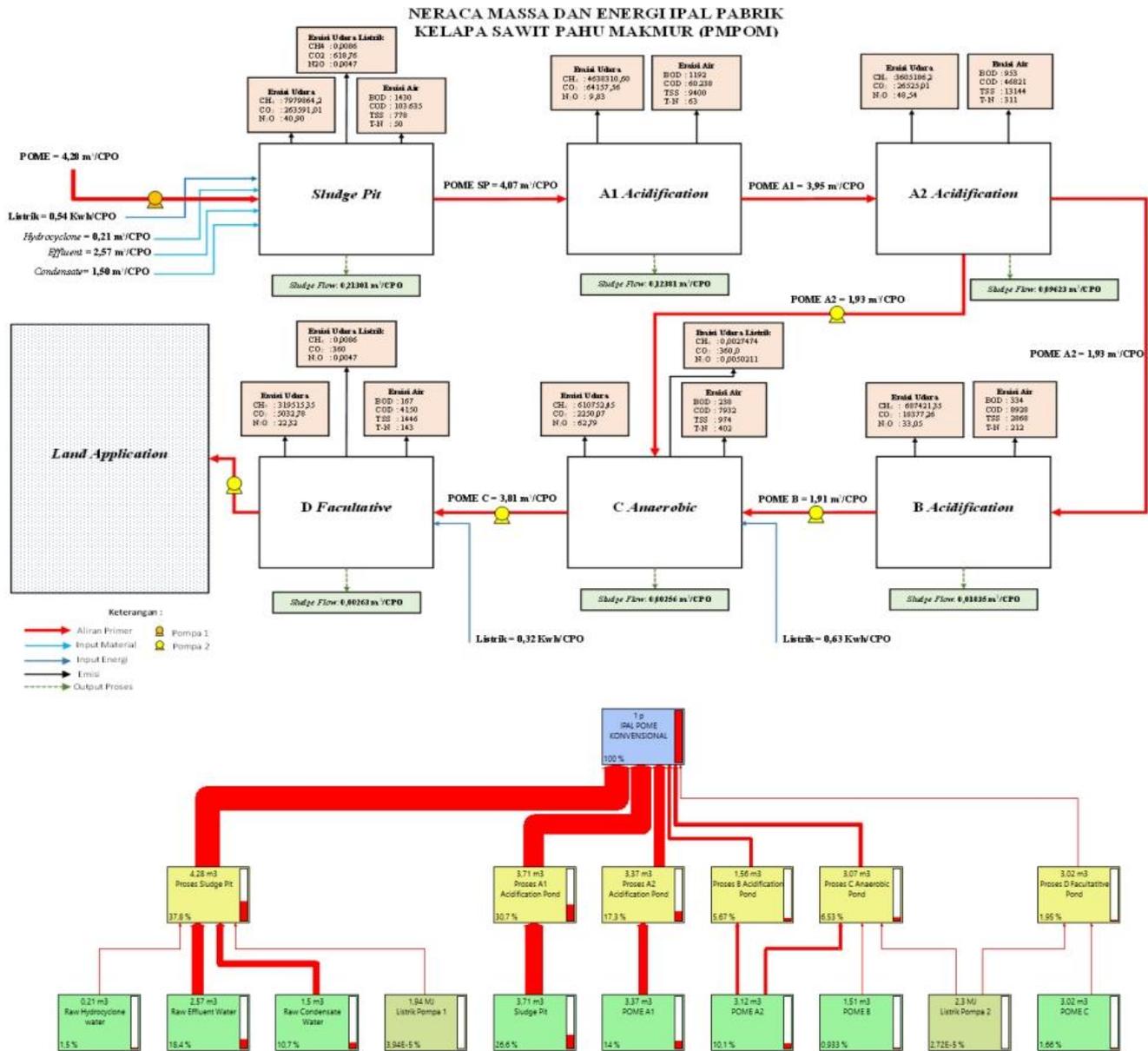
2.2 Inventory Data

Tahap LCI merupakan tahapan identifikasi, pengumpulan dan penghitungan data input (material dan energi) dan output (emisi, produk dan produk samping) yang dikumpulkan secara keseluruhan. Di tahap LCI, data yang dikumpulkan akan dimasukkan ke *software* SimaPro. Selanjutnya, aplikasi tersebut akan menganalisis dampak lingkungan dalam proses pengolahan air limbah POME melalui data yang di input tersebut. Tabel 1 merupakan data LCI pada IPAL PMPOM.

Data input LCA dalam penelitian ini berasal dari data arsip PMPOM selama tahun 2021–2022 yang kemudian dirata-ratakan. Selain itu, terdapat data primer dan sekunder yang berdasarkan data hasil uji laboratorium, hasil perhitungan untuk emisi, maupun literatur. Data yang dimasukkan pada *software* tersebut meliputi data material bahan baku, emisi, penggunaan energi, output produk maupun produk sampingan. Untuk emisi air, diambil data

primer dengan melakukan pengambilan sampel yang diuji di laboratorium dengan parameter COD, BOD, minyak lemak, TSS, pH, dan total nitrogen. Sedangkan emisi udara didapatkan dari pendekatan perhitungan emisi dengan metode IPCC dan US EPA pada sektor air limbah industri dan penggunaan listrik pada pompa dengan menghitung emisi CH₄, N₂O dan CO₂. Dilakukan juga perhitungan aliran *sludge* pada air limbah POME.

Aliran neraca massa dan energi pada IPAL PMPOM ditunjukkan pada Gambar 2. Inventori data beserta diagram alir neraca massa dan energi yang telah dibuat tersebut menjadi dasar untuk melakukan input data di *software* SimaPro. Setelah dilakukan penginputan data berdasarkan inventarisasi yang telah dilakukan, maka akan didapatkan kategori dampak lingkungan yang muncul dari setiap unit proses pengolahan limbah di PMPOM, serta diketahui pula besaran nilai dari dampak yang disesuaikan dengan kategori dampak lingkungan.



Gambar 2. Neraca massa & energi IPAL PMPOM dan network result

2.3 Penentuan Life Cycle Impact Assessment (LCIA) dengan software Simapro Versi 9.3.0

Tahapan ini dilakukan untuk mengevaluasi seberapa besar potensi dampak lingkungan yang dihasilkan oleh beban lingkungan yang diukur dari data inventarisasi pada tahap LCI. Hasil data dari LCI akan dikonversi ke dalam kategori indikator dampak lingkungan. Adapun tahap penentuan

dampak lingkungan ini menggunakan IMPACT 2002+ dalam software Simapro Versi 9.3.0.

Tahapan karakterisasi dilakukan dengan mengalikan setiap kategori dampak dengan faktor karakterisasi untuk menggambarkan sumbangan dampak dari sistem yang sedang dinilai. Input dari setiap sistem akan memengaruhi nilai akhir dari setiap kategori dampak.

Tabel 1. Hasil Life Cycle Inventory (LCI)

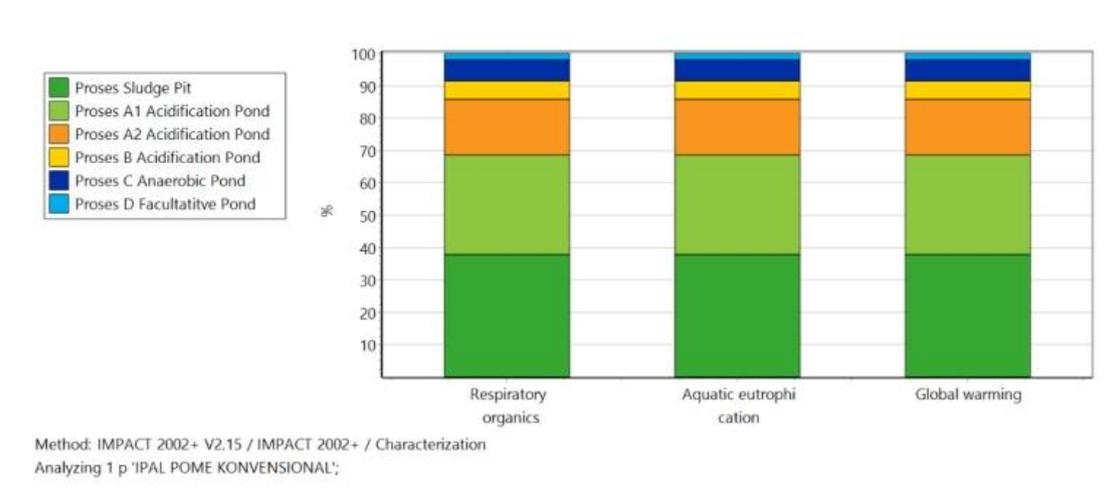
LCI	Unit Proses						Unit	Sumber
	sludge pit	A1 acidification pond	A2 acidification pond	B acidification pond	C anaerobic pond	D facultative pond		
Input								
Hydrocyclone	0,21	-	-	-	-	-	kg	Data PMPOM
Digester	1,50	-	-	-	-	-	kg	Data PMPOM
Clarifier	2,57	-	-	-	-	-	kg	Data PMPOM
POME SP	-	4,28	-	-	-	-	kg	Data PMPOM
POME A1	-	-	4,28	-	-	-	kg	Data PMPOM
POME A2	-	-	-	4,28	2,14	-	kg	Data PMPOM
POME B	-	-	-	-	2,14	-	kg	Data PMPOM
POME C	-	-	-	-	-	4,28	kg	Data PMPOM
listrik	-	-	-	-	0,066	0,033	kWh	Data Primer
Output								
POME SP	0,95	-	-	-	-	-	kg	Data PMPOM
POME A1	-	0,95	-	-	-	-	kg	Data PMPOM
POME A2	-	-	0,95	-	-	-	kg	Data PMPOM
POME B	-	-	-	2,14	-	-	kg	Data PMPOM
POME C	-	-	-	2,14	4,28	-	kg	Data PMPOM
POME D	-	-	-	-	-	4,28	kg	Data PMPOM
Sludge	32,91	19,13	14,87	2,84	2,52	0,40	kg	Perhitungan
Emisi air								
BOD	1.430	1.192	953	334	238	167	kg	Data Primer
COD	103.635	60.238	46.821	8.928	7.932	4.150	kg	Data Primer
TSS	778	9.400	13.144	2.868	974	1.446	kg	Data Primer
Total nitrogen	50	63	311	212	402	143	kg	Data Primer
Emisi udara dari proses biologis pengolahan limbah POME								
CH ₄	7.979.864,2	4.638.310,60	3.605.186,20	687.421,35	610.752,45	319.515,35	kg	IPCC
CO ₂	263.591,01	64.157,56	26.525,01	18.377,26	2.250,07	5.032,78	kg	US-EPA
N ₂ O	40,90	9,83	48,54	33,05	62,79	22,32	kg	IPCC
Emisi udara dari penggunaan pompa								
CH ₄	-	-	-	-	74,70	74,70	kg	ESDM RI
CO ₂	-	-	-	-	0,001041878	0,001041878	kg	ESDM RI
N ₂ O	-	-	-	-	0,000570084	0,000570084	kg	ESDM RI

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil LCIA dengan software Simapro Versi 9.3.0

Berdasarkan Gambar 3, diketahui bahwa unit proses yang berkontribusi besar terhadap dampak lingkungan adalah *sludge pit* dengan persentase sebesar 37,8%. Dapat dilihat garis merah yang menghubungkan di setiap unit proses lebih tebal daripada unit yang lainnya. Selain tempat pengutipan kembali minyak, *sludge pit* berfungsi juga untuk menurunkan suhu POME hingga mencapai kondisi yang optimum untuk proses penguraian zat organik pada kolam selanjutnya. Tingginya persentase kontribusi dampak

lingkungan pada *sludge pit* diakibatkan karena tingginya bahan organik seperti COD dan total nitrogen. Proses ini juga mempengaruhi proses biologis di IPAL POME yang dapat menghasilkan GRK. Meningkatnya nilai COD dalam limbah POME mengindikasikan jumlah bahan organik yang lebih tinggi dalam limbah tersebut. Ketika limbah memiliki konsentrasi COD yang tinggi, proses degradasi anaerobik akan terjadi, sehingga bakteri anaerobik akan menguraikan bahan organik tersebut dan menghasilkan biogas. (Yacob et al., 2006).



Gambar 3. Grafik hasil karakterisasi

Berdasarkan hasil dari karakterisasi, diketahui bahwa terdapat tiga dampak lingkungan penting yaitu *respiratory organic*, eutrofikasi perairan dan *global warming*. Tabel 1 merupakan hasil dari karakterisasi per unit proses pengolahan limbah POME di IPAL PMPOM, yang sudah dilakukan perhitungan melalui *software* Simapro.

3.1.1 Global Warming

Dari hasil dari karakterisasi di *software* SimaPro, kontribusi besar yang mengakibatkan akumulasi gas-gas kimia di atmosfer berasal dari aktivitas pengolahan biologi untuk limbah POME dan penggunaan energi listrik. Tabel 2 merupakan nilai total kontribusi emisi gas penyebab *global warming* dari proses pengolahan limbah POME.

Tabel 2. Hasil *characterization*

Unit proses	Kategori dampak		
	<i>Respiratory organic</i> (kg C ₂ H ₄ eq)	Eutrofikasi perairan (kg PO ₄ eq)	<i>Global warming</i> (kg CO ₂ eq)
<i>Sludge pit</i>	253.197,7	12.038,2	3,20E+08
<i>A1 acidification pond</i>	205.783,2	97.83,9	2,60E+08
<i>A2 acidification pond</i>	115.598,4	54.96,1	1,46E+08
<i>B acidification pond</i>	37.928,3	1.803,3	4,80E+07
<i>C anaerobic pond</i>	43.705,4	2.078,0	5,53E+07
<i>D facultative pond</i>	13.004,2	618,3	1,65E+07
Total	669217,3	31817,9	8,47E+08

Berdasarkan Tabel 2, diperoleh jumlah total emisi gas penyebab *global warming* IPAL POME sebesar 8,47E+08 kg CO₂eq/hari. Menurut Tabel 3, dapat dilihat bahwa *sludge pit* adalah unit proses yang memiliki total emisi tertinggi dengan kontribusi sebesar 37,8%. *A1 acidification pond* juga memiliki kontribusi yang signifikan sebesar 30,7%. Unit proses lainnya, seperti *A2 acidification pond*, *B acidification pond*, *C anaerobic pond*, dan *D facultative pond*, memiliki kontribusi yang lebih rendah dalam total emisi. Berdasarkan laporan dari Wijono (2017), emisi yang dihasilkan dari proses pengolahan limbah POME hanya sebesar 541.985 kg CO₂eq, lebih kecil dari penelitian ini. Perbedaan data tersebut terjadi karena diduga

adanya nilai inventarisasi yang berbeda di setiap unit proses. Salah satunya yakni tingginya nilai emisi CH₄ biogenik yang sangat mendominasi dan mempengaruhi penilaian dampak yang dihasilkan. Sedangkan, emisi CH₄ biogenik yang dihasilkan oleh POME pada penelitian sebelumnya hanya sebesar 21,7 kg.

Tabel 3. Nilai total emisi penyebab *global warming*

Unit proses	Satuan	Total emisi	Kontribusi emisi (%)
<i>Sludge pit</i>	kg CO ₂ eq	3,20E+08	37,8
<i>A1 acidification pond</i>	kg CO ₂ eq	2,60E+08	30,7
<i>A2 acidification pond</i>	kg CO ₂ eq	1,46E+08	17,3
<i>B acidification pond</i>	kg CO ₂ eq	47984458	5,7
<i>C anaerobic pond</i>	kg CO ₂ eq	55.303.162	6,5
<i>D facultative pond</i>	kg CO ₂ eq	16.479.486	1,9
Total		8,47E+08	100

Tabel 4. Parameter emisi gas penyebab *global warming* di IPAL POME

Emisi	Jenis emisi	Unit	Total
CO ₂ fosil	udara	kg CO ₂ eq	564,53
N ₂ O	udara	kg CO ₂ eq	151.059,25
CH ₄ biogenik	udara	kg CO ₂ eq	8,46E+08
CH ₄ , fosil	udara	kg CO ₂ eq	0,081

3.1.2 Eutrofikasi

Selanjutnya, dampak eutrofikasi perairan merupakan suatu keadaan yang berhubungan dengan peningkatan bahan organik dan unsur hara di perairan. Dari hasil karakterisasi di *software* SimaPro, dapat diketahui bahwa kontribusi besar yang mengakibatkan akumulasi emisi di perairan ialah aktivitas pengolahan biologi dari limbah POME. Proses tersebut menghasilkan nilai beban pencemar bahan organik yang tinggi terutama total nitrogen dan COD. Tabel 5 merupakan nilai total kontribusi emisi air penyebab eutrofikasi dari unit proses pengolahan limbah POME.

Berdasarkan Tabel 6, total emisi gas penyebab eutrofikasi perairan pada unit proses IPAL POME sebesar 33.622,2 kg PO₄eq/hari. dapat dilihat bahwa nilai karakterisasi emisi terbesar penyebab eutrofikasi perairan terdapat pada unit proses *sludge pit* dengan total emisi per unit sebesar 12.149,12 kg PO₄eq/hari. Berdasarkan laporan dari Nasution

et al., (2020), emisi yang dihasilkan dari proses pengolahan limbah POME dengan kolam terbuka sebesar 7,73 kgPO₄eq sangat jauh berbeda dari penelitian ini. Perbedaan data tersebut terjadi karena diduga adanya nilai inventarisasi yang berbeda di setiap unit proses. Dalam laporannya juga disebutkan eutrofikasi yang disebabkan oleh POME dihitung berdasarkan fraksi massa total nitrogen serta COD, sehingga perbedaan nilai kedua parameter tersebut sangat mempengaruhi hasil penilaian dampak.

Tabel 5. Parameter emisi penyebab eutrofikasi perairan IPAL POME

Emisi	Jenis emisi	Satuan	Total
Chemical Oxygen Demand	Air	kg PO ₄ eq	31.817,9
Total nitrogen	Air	kg PO ₄ eq	1.804,9

Tabel 6. Nilai total emisi penyebab eutrofikasi perairan

Unit proses	Satuan	Total emisi	Kontribusi emisi (%)
Sludge pit	kg PO ₄ eq	12.149,12	37,8
A1 acidification pond	kg PO ₄ eq	9.888,29	30,7
A2 acidification pond	kg PO ₄ eq	5.715,90	17,3
B acidification pond	kg PO ₄ eq	2.096,12	5,7
C anaerobic pond	kg PO ₄ eq	2.585,05	6,5
D facultative pond	kg PO ₄ eq	1.188,26	1,9
Total		33.622,8	100

3.1.3 Respiratory Organics

Selanjutnya *respiratory organics* adalah dampak yang timbul pada lingkungan terkait kesehatan manusia. Dampak ini merupakan dampak yang akan terjadi pada saluran pernafasan yang disebabkan oleh substansi organik (Ratni, 2022). Berdasarkan hasil dari karakterisasi di *software* SimaPro, kontribusi besar yang mengakibatkan akumulasi gas-gas kimia ini di atmosfer berasal dari aktivitas pengolahan biologis limbah POME. Tabel 7 berikut merupakan nilai total kontribusi emisi gas penyebab *respiratory organics* dari proses pengolahan limbah POME.

Tabel 7. Nilai total kontribusi emisi penyebab *respiratory organics* IPAL POME

Unit proses	Satuan	Total emisi	Kontribusi emisi (%)
Sludge pit	kg C ₂ H ₄ eq	253.197,7	37,8
A1 acidification pond	kg C ₂ H ₄ eq	205.783,2	30,7
A2 acidification pond	kg C ₂ H ₄ eq	115.598,4	17,3
B acidification pond	kg C ₂ H ₄ eq	379.28,3	5,7
C anaerobic pond	kg C ₂ H ₄ eq	43.705,4	6,5
D facultative pond	kg C ₂ H ₄ eq	13.004,2	1,9
Total		669.217,3	100

Tabel 8. Parameter emisi penyebab *respiratory organics*

Emisi	Jenis emisi	Unit	Total
Metana (CH ₄), Biogenik	Gas	kg C ₂ H ₄ eq	669.217,3

Berdasarkan nilai kontribusi emisi gas, penyebab *respiratory organics* terbesar diketahui berasal dari gas metana (CH₄) biogenik dengan nilai sebesar 253.197,7 kg C₂H₄eq/hari. Sumber emisi CH₄ biogenik berasal dari proses biologis di

IPAL POME. Menurut Tabel 8 dapat dilihat bahwa persentase unit proses yang menyumbang emisi CH₄ biogenik terbesar yaitu pada unit *sludge pit* sebesar 37,8 % dengan emisi 253.197,7 kg C₂H₄eq/hari. Sejauh ini belum ada penelitian yang membahas secara lanjut terkait tingkat *respiratory organic* pada pengolahan POME, sehingga perbandingan hasil penilaian dampak belum dapat dilakukan.

3.2 Interpretasi

Gas rumah kaca (GRK) merupakan salah satu faktor yang menyebabkan terjadinya pemanasan global. GRK terjadi karena senyawa-senyawa gas di atmosfer memantulkan kembali panas ke bumi, yang seharusnya dapat lepas ke luar bumi. Gas ini terdapat secara alami di atmosfer dan juga diproduksi oleh aktivitas manusia yang menghasilkan gas dan radiasi inframerah (Latuconsina, 2010). Dalam penelitian ini aktivitas pengolahan limbah POME telah meningkatkan konsentrasi GRK di udara. Hal ini disebabkan oleh penggunaan kolam pengolahan biologis sebagai metode pengolahan limbah POME di PMPOM. Berdasarkan analisis di *software* SimaPro, kontribusi emisi *global warming* terbesar pada metode ini berasal dari produksi gas metana (CH₄) biogenik, CO₂ biogenik dan N₂O dengan jumlah yang besar dari aktivitas mikroorganisme di setiap unit proses IPAL. Adapun sumber emisi selanjutnya berupa emisi penggunaan energi listrik berupa CO₂ fosil dan CH₄ fosil dari penggunaan energi listrik dari pompa. Kedua emisi ini merupakan salah satu emisi yang dikeluarkan pada saat dilakukannya produksi energi listrik dengan menggunakan bahan bakar fosil. Penggunaan energi listrik di unit proses C *anaerobic pond* memiliki nilai yang lebih besar daripada kolam D *facultative pond* karena kolam C menggunakan dua pompa untuk bisa memompa dari dua kolam yaitu A2 *acidification pond* dan B *acidification pond*.

Eutrofikasi perairan merupakan kondisi perairan yang mengalami peningkatan fitoplankton dengan ditandai oleh tumbuhnya tumbuhan air (*blooming algae*) akibat peningkatan kadar bahan organik (Simbolon et al., 2021). Dari hasil analisis *software* SimaPro 9.3.0, kontribusi emisi eutrofikasi perairan terbesar pada metode ini berasal dari COD dan total nitrogen. Parameter COD paling baik dalam menggambarkan kandungan zat organik penyebab eutrofikasi, baik yang dapat diuraikan secara biologis maupun yang tidak. Proses dekomposisi zat organik secara anaerob akan menghasilkan unsur hara, salah satunya total nitrogen. Kadar total nitrogen yang tinggi dalam perairan juga dapat merangsang *blooming algae* (Simbolon et al., 2021). Apabila limbah POME ini tidak diolah di IPAL, maka dapat menyebabkan eutrofikasi jika dialirkan langsung ke badan air. Dalam pelaksanaannya, limbah POME ini harus diolah terlebih dahulu. Limbah POME yang telah diolah akan dimanfaatkan sebagai pupuk cair di *land application*.

Selanjutnya, dampak lingkungan *respiratory organic* merupakan dampak akibat adanya konsentrasi gas metana biogenik yang tinggi di sekitar IPAL PMPOM. Dampak dari hal tersebut yakni berkurangnya konsentrasi oksigen di atmosfer, sehingga dapat menimbulkan gejala kekurangan oksigen. Apabila kandungan oksigen di udara turun di bawah 19,5%, dapat mengakibatkan asfiksia atau kehilangan kesadaran pada makhluk hidup karena kekurangan pasokan oksigen ke dalam tubuh (Ratih et al., 2016).

3.3 Skenario Potensi Perbaikan Berkelanjutan

PMPOM memproses TBS dan menghasilkan limbah cair POME. Pada kondisi aktual di pabrik, limbah cair ini diolah di kolam pengolahan POME terlebih dahulu sebelum dibuang ke aliran sungai atau dialirkan ke *land application* sebagai pupuk. Setiap proses pengolahan limbah POME di pabrik tersebut diketahui hanya menggunakan metode konvensional. Metode ini berpotensi dapat melepaskan biogas dengan jumlah yang besar dan belum terolah ke atmosfer. Biogas adalah gas yang terbentuk selama proses pencernaan anaerobik dari bahan organik dengan beberapa komposisi senyawa pembentuknya. Unsur utamanya berupa CH₄, CO₂, H₂S dan senyawa organik lainnya.

Menurut analisis LCA yang telah dilakukan, apabila biogas ini tidak diolah dan dibiarkan, akan meningkatkan potensi dampak penting terbesar berupa *global warming* dan *respiratory organic*. Kedua dampak ini menjadi fokus untuk dilakukan perbaikan berkelanjutan, dikarenakan memiliki kesamaan dari sumber emisi yang berasal dari metana biogenik yang sangat tinggi. Untuk mengurangi kedua dampak lingkungan ini, perlu adanya alternatif perbaikan untuk bisa mengurangi dampak lingkungan akibat proses pengolahan limbah POME. Sedangkan, untuk dampak eutrofikasi perairan di kondisi aktual, diketahui bahwa dampak lingkungan ini dapat dikatakan masih terkendali di areal sekitar PMPOM. Hal ini dikarenakan limbah POME telah dimanfaatkan sebagai pupuk cair organik di area *land application*.

Biogas merupakan salah satu sumber energi bersih karena tidak menghasilkan limbah yang mencemari sungai ataupun mencemari air, dan bahkan dapat membantu mengurangi pencemaran udara dan tanah. Dengan begitu, penggunaan Pembangkit Listrik Tenaga Biogas (PLTBg) dapat meningkatkan produksi energi bersih dalam negeri dan membantu dalam transisi nasional menuju sumber energi yang terbarukan.

3.3.1 Keuntungan secara lingkungan

Untuk mengetahui seberapa efisien tindakan yang dilakukan dalam pengurangan dampak lingkungan, maka akan dilakukan perbandingan antara metode pengolahan limbah POME secara konvensional dengan metode digester anaerobik untuk PLTBg. Perbandingan tersebut dilakukan dengan menggunakan data referensi yang sudah ada. Data hasil inventarisasi ditampilkan di Tabel 9.

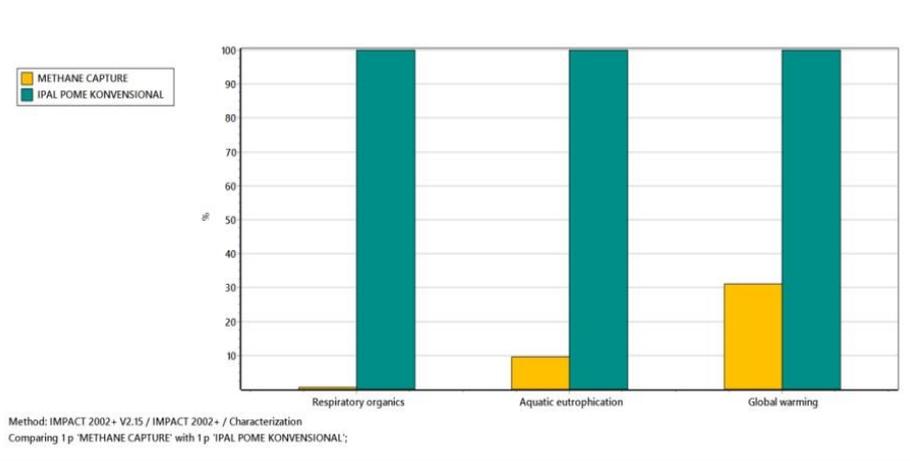
Berdasarkan analisis LCI yang ditampilkan di Tabel 9, dapat diketahui hasil LCIA. Dampak lingkungan potensial yang signifikan dari proses berdasarkan LCI dievaluasi menggunakan penilaian dampak berdasarkan metode pilihan yang disesuaikan dengan kategori dampak dengan Simapro yang ditampilkan di Tabel 10 dan Gambar 4.

Tabel 9. *Life Cycle Inventory* PLTBg, (Unit Fungsi = 1 Ton CPO)

Material	Data awal	Data diolah	Satuan	Sumber data
Input				
Produksi POME	378,07	378,07	ton	Perhitungan
Air	0,01	100	m ³	(Aziz et al., 2020)
Energi				
<i>Transfer pump</i>	1,5	1,5	kWh	(Febijanto, 2010)
<i>Blower</i>	0,0018	7,0	kWh	(Sharvini et al., 2020)
H ₂ S <i>scrubber</i>	0,00075	2,9	kWh	(Sharvini et al., 2020)
<i>Chiller</i>	0,001	3,9	kWh	(Sharvini et al., 2020)
<i>Flaring</i>	0,2	0,2	kWh	(Sharvini et al., 2020)
Pengadukan	0,5	0,5	kWh	(Rahayu et al., 2015)
Proses				
Produksi Biogas	20,8	860,1	m ³	(Wijono, 2017)
Produksi CH ₄	7979864,2	7.979.864,2	kg	Perhitungan
Listrik	3,9	3.940	kWh	Perhitungan
<i>Sludge</i>	0,11	429,0	kg	(Aziz et al., 2020)
Emisi				
CO ₂ (kolam terbuka)	14,79	5.591,7	kg CO ₂ eq	(Aziz et al., 2020)
CH ₄	8,94	160,9	kg CO ₂ eq	(Aziz et al., 2020)
COD	0,051	198,9	kg PO ₄ eq	(Sharvini et al., 2020)
Nitrogen total	0,0032	12,5	kg PO ₄ eq	(Sharvini et al., 2020)
<i>Transfer pump</i> (CO ₂)	0,026	101,4	kg CO ₂ eq	(Sharvini et al., 2020)
<i>Blower</i> (CO ₂)	0,0012	4,7	kg CO ₂ eq	(Sharvini et al., 2020)
<i>Scrubber</i> (CO ₂)	0,00052	2,0	kg CO ₂ eq	(Sharvini et al., 2020)
<i>Chiller</i> (CO ₂)	0,00069	2,7	kg CO ₂ eq	(Sharvini et al., 2020)

Tabel 10. Hasil perbandingan LCIA efisiensi pengelolaan dampak lingkungan

Kategori dampak	Unit	Methane capture	Tanpa methane capture	Persen reduksi Emisi
<i>Respiratory organics</i>	kg C ₂ H ₄ eq	3.553,0	669.217,3	99,47%
Eutrofikasi perairan	kg PO ₄ eq	3.070,1	31.817,9	91,20%
<i>Global warming</i>	kg CO ₂ eq	2,64E+08	8,47E+08	76,24%



Gambar 4. Grafik LCIA perbandingan efisiensi pengelolaan dampak lingkungan

Dari Tabel 10 dan Gambar 4, penggunaan metode digester anaerobik untuk PLTBg sangat efisien untuk mengurangi dampak lingkungan. Menurut hasil analisis, perbandingan ketiga dampak lingkungan sebelum dan setelah menggunakan digester anaerobik sangat signifikan. Dari hasil perhitungan, adanya digester anaerobik pada PLTBg sebagai pemanfaatan POME berpotensi menurunkan emisi GRK sebesar 5,83E+08 kg CO₂eq/hari atau setara dengan 76,24%. Karenanya, penggunaan digester anaerobik untuk PLTBg sangat layak diterapkan di PMPOM dalam lingkup perbaikan berkelanjutan pengelolaan dampak lingkungan terutama *global warming*.

3.3.2 Keuntungan secara ekonomi

Perhitungan potensi pembangkitan energi dari biogas dapat dilakukan dengan menggunakan nilai dari beberapa parameter penting. Tabel 11 menguraikan parameter input yang telah diidentifikasi di PMPOM beserta asumsi parameter operasi dalam perhitungan potensi daya sebagai berikut:

Tabel 11. Identifikasi parameter input di PMPOM

Parameter	Input	Unit
Jam operasi	3.136	jam/hari
Hari operasi	283	hari/tahun
TBS tahunan	159.781	ton tbs/tahun
Rasio POME	1,38	m ³ /ton tbs
COD	103634,6	mg/l

Berdasarkan data, dapat digunakan sebagai acuan untuk perhitungan potensi energi listrik yang dihasilkan dari PMPOM adalah sebagai berikut:

$$\text{Aliran limbah cair harian} = 50 \frac{\text{ton FFB}}{\text{jam}} \times \frac{3.136 \text{ jam}}{283 \text{ hari}} \times 1,38 \frac{\text{m}^3 \text{ POME}}{\text{ton TBS}} = 765 \frac{\text{m}^3}{\text{hari}}$$

.....(1)

$$\text{COD loading} = 103.634,6 \frac{\text{mg COD}}{\text{L}} \times 765 \frac{\text{m}^3}{\text{hari}} \times \frac{\text{kg}}{10^6 \text{mg}} = 79.240 \frac{\text{kg COD}}{\text{hari}}$$

..... (2)

$$\text{Produksi CH}_4 = 79.240 \frac{\text{kg COD}}{\text{hari}} \times 90\% \times 0,35 \frac{\text{Nm}^3 \text{CH}_4}{\text{kg COD}} = 24.960 \frac{\text{Nm}^3 \text{CH}_4}{\text{hari}}$$

..... (3)

Kapasitas Pembangkit daya yang dapat dihasilkan dari PMPOM adalah:

$$24.960 \frac{\text{Nm}^3 \text{CH}_4}{\text{hari}} \times 35,7 \frac{\text{MJ}}{\text{Nm}^3 \text{CH}_4} \times 38\% \times \frac{\text{hari}}{24 \times 60 \times 60 \text{ detik}} = 3,94 \text{ MWe}$$

(4)

Berdasarkan hasil perhitungan yang dilakukan, dapat disimpulkan bahwa PMPOM memiliki kemampuan untuk membangun PLTBg dengan kapasitas pembangkit daya sebesar 3,94 MWe. Menurut Sugiyono *et al* (2019) kapasitas PLTBg 3–5 MWe mampu memproduksi sekitar 1.448.667 m³ metana setiap tahunnya, yang dapat menghasilkan listrik sebanyak 5.794.668 kWh. Namun, sekitar 11% dari listrik yang dihasilkan nantinya akan digunakan untuk kebutuhan sendiri, sehingga jumlah listrik yang dapat dijual mencapai 5.157.254 kWh per tahun. Diketahui bahwa pada tahun 2019, harga jual listrik ke PLN sebesar 1.250 Rp/kWh, sehingga potensi pendapatan mencapai Rp. 6.443.988.873. Harga jual listrik diasumsikan akan meningkat sebesar 1,5% setiap tahun.

Hasil perhitungan oleh Sugiyono *et al* (2019) menunjukkan bahwa PLTBg layak untuk dibangun, dengan IRR sebesar 11,44% yang lebih tinggi dari *weighted average cost of capital* (WACC) sebesar 10,86%. Jangka waktu pengembalian modal (PBP) adalah 7 tahun 11 bulan, dengan NPV sebesar Rp. 1.103.209.098 dan *profitability index* (PI) sebesar 2,64.

3.3.3 Keuntungan secara sosial

Keuntungan sosial yang di dapat oleh PMPOM dengan adanya proyek PLTBg yaitu melalui program *Corporate Sosial Responsibility* (CSR). Program CSR merupakan bentuk tanggung jawab secara sosial oleh perusahaan terhadap masyarakat sekitar lokasi pabrik kelapa sawit. Ada beberapa cara yang dapat diimplementasikan agar dapat memenuhi program CSR yaitu dengan dibangunnya instalasi kelistrikan di mes dan perumahan karyawan. Instalasi kelistrikan ini dilakukan dengan mengganti bahan bakar solar pada genset dengan memanfaatkan biogas dari limbah POME sebagai material dari PLTBg. Perusahaan juga dapat membantu PLN mempercepat penyediaan akses energi listrik untuk daerah 3T (Terdepan, Terpencil dan Tertinggal). Adanya proyek PLTBg akan membantu menciptakan lapangan kerja yang ramah lingkungan bagi masyarakat sekitar. Dampak positif ini dapat

memberikan efek berganda pada pembangunan ekonomi dan kesejahteraan sosial yang lebih baik dan berkelanjutan.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa:

1. Sumber dampak lingkungan yang diakibatkan oleh pengolahan limbah POME di IPAL PMPOM berasal dari enam unit kolam. Dampak lingkungan yang dihasilkan yaitu *global warming* dengan memperoleh nilai karakterisasi dampak sebesar $8,47E+08$ kg CO₂eq/hari. Dampak ini dihasilkan dari kontribusi emisi dari CH₄ biogenik, N₂O, CH₄ fosil dan CO₂ Fosil. Dampak selanjutnya yaitu eutrofikasi perairan dengan nilai karakterisasi dampak sebesar 33.622,8 kg PO₄eq/hari. Nilai tersebut dihasilkan dari dua kontribusi emisi yang bersumber dari parameter COD dan Total nitrogen. Dampak selanjutnya adalah *respiratory organic* dengan nilai karakterisasi dampak sebesar 253.197,7 kg C₂H₄eq/hari. Nilai tersebut dihasilkan dari satu kontribusi emisi yang bersumber pada CH₄ biogenik.
2. Rekomendasi kepada perusahaan untuk dapat melakukan tindakan berkelanjutan yang layak ditinjau dari aspek lingkungan, ekonomi dan sosial yaitu dengan membuat digester anaerobik sebagai pemanfaatan Pembangkit Listrik Tenaga Biogas (PLTBg) yang akan menghasilkan listrik setara dengan 3,94 MWe.

PERSANTUNAN

Ucapan terima kasih kepada Fakultas Teknik Universitas Mulawarman atas bantuannya dalam menyediakan lisensi software SimaPro 9.3.0 dan tidak lupa untuk bantuan kepada pihak pabrik kelapa sawit Pahu Makmur yang memberikan izin sebagai tempat penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad, M., Tobing, B. P. L., Purnomo, B. H., Suntoro, T., Ilham, Mursal, T., Ernawati, P. A. M., Ramadhan, D., Prambadha, Y. B., Sandi, H., S. A. B., Arfianto, M. R., Hasibuan, A., & Ananto, Y. (2018). *Pedoman Penghitungan dan Pelaporan Inventarisasi Gas Rumah Kaca Bidang Energi - Sub Bidang Ketenagalistrikan*. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.
- Aziz, N. I. H. A., Hanafiah, M. M., Gheewala, S. H., & Ismail, H. (2020). Bioenergy for a Cleaner Future: a Case Study of Sustainable Biogas Supply Chain in the Malaysian Energy Sector. *Sustainability (Switzerland)*, 12(8), 1–24. <https://doi.org/10.3390/SU12083213>
- Febijanto, I. (2010). Pemanfaatan Potensi Gas Metana di Pabrik Kelapa Sawit Sei Silau, PTPN 3 Sumatera Utara. *Jurnal Teknik Lingkungan*, 11(3), 459–474. <https://doi.org/10.29122/jtl.v11i3.1192>
- Harimurti, D., Hariyadi, H., & Noor, E. (2021). Pengurangan Emisi Gas Rumah Kaca Pada Perkebunan Kelapa Sawit Dengan Pendekatan Life Cycle Assessment. *Jurnal Pengelolaan Sumber Daya Alam Dan Lingkungan*, 11(1), 1–9. <https://doi.org/10.29244/jpsl.11.1.1-9>
- Ilmannafian, A. G., Lestari, E., & Khairunisa, F. (2020). Pengolahan Limbah Cair Pabrik Kelapa Sawit dengan Metode Filtrasi dan Fitoremediasi Menggunakan Tanaman Eceng Gondok (*Eichhornia Crassipes*). *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 21(2), 244–253. <https://doi.org/10.29122/jtl.v21i2.4012>
- Latuconsina, H. (2010). Dampak pemanasan global terhadap ekosistem pesisir dan lautan. *Jurnal Agribisnis Perikanan*, 3(1), 30–37. <https://doi.org/10.29239/j.agrikan.3.1.30-37>
- Nasution, M. A., Wulandari, A., Ahamed, T., & Noguchi, R. (2020). Alternative POME Treatment Technology in The Implementation of Roundtable on Sustainable Palm Oil, Indonesian Sustainable Palm Oil (ISPO), and Malaysian Sustainable Palm Oil (MSPO) Standards Using LCA and AHP Methods. *Sustainability (Switzerland)*, 12(10), 1–16. <https://doi.org/10.3390/su12104101>
- Nugroho, A. (2019). Teknologi Agroindustri Kelapa Sawit. In *Lambung Mengukur Universitas Press* (1st ed., Issue August). Lambung Mengukur Universitas Press.
- Putro, L. H. S. (2022). Emissions of CH₄ and CO₂ From Wastewater of Palm Oil Mills: A Real Contribution To Increase the Greenhouse Gas and its Potential as Renewable Energy Sources. *Environment and Natural Resources Journal*, 20(1), 61–72. <https://doi.org/10.32526/ENNRJ/20/202100149>
- Rahayu, A. S., Karsiwulan, D., & Yuwono, H. (2015). *Konversi POME Menjadi Biogas*. Winrock International.
- Ratih, A., & Tofan, A. (2016). Pengaruh Paparan Ch₄ Dan H₂S Terhadap Keluhan Gangguan Pernapasan Pemulung Di TPA Mrican Kabupaten Ponorogo. *Journal of Industrial Hygiene and Occupational Health*, 1(1), 1–14. <https://doi.org/10.21111/jihoh.v1i1.603>
- Ratni J.A.R, N., & Maulana, I. (2022). Identifikasi Dampak Lingkungan Pada Proses Pengolahan Lumpur Tinja (IPLT) Jabon Dengan Metode Life Cycle Assessment (LCA). *EnviroUS*, 2(2), 86–92. <https://doi.org/10.33005/enviroUS.v2i2.117>
- Sharvini, S. R., Noor, Z. Z., Chong, C. S., Stringer, L. C., & Glew, D. (2020). Energy Generation From Palm Oil Mill Effluent: a Life Cycle Assessment of Two Biogas Technologies. *Journal of Energy*, 191, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116513>
- Simbolon, R. H., Simbolon, R., & Harahap, R. (2021). Analisa Pengolahan Air Limbah Pabrik Kelapa Sawit PT. Hutabayu Marsada Kecamatan Hutabayu Raja Kabupaten Simalungun. *Seminar Nasional Teknik (SEMNASTEK) UISU*, 217–221.
- Subramaniam, V., Yuen May, C., Muhammad, H., Hashim, Z., Tan, Y. A., & Chiew Wei, P. (2010). Life Cycle Assessment of The Production of Crude Palm Oil (Part 3). *Journal of Oil Palm Research*, 22, 895–903.
- Sugiyono, A., Adiarso, A., Puspita Dewi, R. E., Yudiartono, Y., Wijono, A., & Larasati, N. (2019). Analisis Keekonomian Pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Biogas Dari POME Dengan Continuous Stirred Tank Reactor

- (CSTR). *Majalah Ilmiah Pengkajian Industri*, 13(1), 75–84.
<https://doi.org/10.29122/mipi.v13i1.3232>
- Wijono, A. (2017). Dampak Pengurangan Emisi Gas Rumah Kaca Pada Pemanfaatan POME Untuk Pembangkit. *Seminar Nasional Sains Dan Teknologi*, 1–9.
- Wu, T. Y., Mohammad, A. W., Jahim, J. M., & Anuar, N. (2010). Pollution Control Technologies For the Treatment of Palm Oil Mill Effluent (POME) Through End-of-Pipe Processes. *Journal of Environmental Management*, 91, 1467–1490.
- <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.02.008>
- Yacob, S., Ali Hassan, M., Shirai, Y., Wakisaka, M., & Subash, S. (2006). Baseline study of methane emission from anaerobic ponds of palm oil mill effluent treatment. *Science of the Total Environment*, 366(1), 187–196.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.07.003>