
POTENSI DAMPAK LINGKUNGAN DI UNIT PENGOLAHAN AIR LIMBAH DI INDUSTRI MINYAK GORENG SURABAYA

Henokh Wau¹, Aulia Ulfah Farahdiba²

^{1,2}Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur

Email: 22034010021@student.upnjatim.ac.id

Abstrak: Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi potensi dampak lingkungan dari unit pengolahan air limbah di Industri Minyak Goreng Surabaya yang bergerak di bidang pengolahan minyak sawit. Metode yang digunakan adalah *Life Cycle Assessment* (LCA) sesuai standar ISO 14040 dan ISO 14044, dengan analisis berbasis perangkat lunak *openLCA* menggunakan metode *Impact 2002+*. Data inventori dikumpulkan melalui observasi langsung dan wawancara, mencakup konsumsi energi, penggunaan bahan kimia, serta aliran input-output dari setiap unit proses. Hasil analisis menunjukkan bahwa kategori dampak terbesar berasal dari *aquatic ecotoxicity*, *global warming*, *ionizing radiation*, *non-renewable energy*, dan *terrestrial ecotoxicity*. Unit pembubuh memberikan kontribusi dampak paling rendah, sedangkan unit utama seperti bak penampung, sumpit, grease trap, bak ekualisasi, dan DAF menyumbang dampak yang signifikan, terutama pada konsumsi energi tak terbarukan dan emisi gas rumah kaca. Kesimpulan penelitian menekankan perlunya strategi mitigasi melalui efisiensi energi, substitusi bahan kimia, serta pemanfaatan energi terbarukan seperti panel surya untuk mendukung keberlanjutan operasional IPAL.

Kata Kunci: Life Cycle Assessment, IPAL, openLCA, Impact 2002+, Dampak Lingkungan.

Abstract: This study aims to evaluate the potential environmental impacts of wastewater treatment units in the Surabaya Cooking Oil Industry, which is engaged in palm oil processing. The method used is a Life Cycle Assessment (LCA) according to ISO 14040 and ISO 14044 standards, with analysis based on openLCA software using the Impact 2002+ method. Inventory data was collected through direct observation and interviews, covering energy consumption, chemical use, and input-output flows from each process unit. The analysis results show that the largest impact categories come from aquatic ecotoxicity, global warming, ionizing radiation, non-renewable energy, and terrestrial ecotoxicity. The agglomeration unit contributes the lowest impact, while the main units such as the storage tank, sump, grease trap, equalization tank, and DAF contribute significant impacts, especially on non-renewable energy consumption and greenhouse gas emissions. The study's conclusions emphasize the need for mitigation strategies through energy efficiency, chemical substitution, and the use of renewable energy such as solar panels to support the sustainable operation of wastewater treatment plants (WWTPs).

Keywords: Life Cycle Assessment, WWTP, openLCA, Impact 2002+, Environmental Impact.

PENDAHULUAN

Industri Minyak Goreng Surabaya merupakan salah satu perusahaan publik yang bergerak di bidang produk konsumen berbasis kelapa sawit, yang beroperasi secara terintegrasi dan merupakan salah satu yang terkemuka di Indonesia, dengan komitmen yang kuat untuk memproduksi minyak sawit secara berkelanjutan. Sebagai bagian dari kegiatan operasional, perusahaan menjalankan fasilitas pengolahan air limbah yang bertujuan untuk mengolah air limbah yang dihasilkan dari berbagai proses internal sebelum dibuang ke lingkungan. Jumlah air limbah yang dikelola sangat besar, yaitu sekitar 318.961 m³ setiap harinya, sehingga kemungkinan dampak lingkungan dari proses pengolahannya menjadi hal penting yang perlu diperiksa secara menyeluruh. Proses pengelolaan limbah ini mencakup langkah-langkah fisika dan kimia yang dapat menghasilkan emisi gas rumah kaca dan limbah yang mungkin berdampak pada kualitas lingkungan di sekitarnya.

Penduduk yang tinggal di sekitar area Industri Minyak Goreng Surabaya adalah kelompok yang paling dekat dengan kemungkinan dampak lingkungan yang terjadi. Kawasan sekitar dipenuhi oleh tempat tinggal yang padat dengan sistem drainase terbuka, sehingga perubahan dalam kualitas air dan udara dapat langsung memengaruhi kesehatan serta kesejahteraan warga. Sebaliknya, terdapat peluang besar untuk meningkatkan kemampuan masyarakat dalam memantau lingkungan serta memperkuat kerjasama antara industri dan komunitas dalam usaha pengelolaan lingkungan yang lebih berkelanjutan. Situasi ini menjadikan studi tentang dampak lingkungan sebagai upaya strategis dalam mendukung kelangsungan operasional perusahaan serta menjaga kelestarian lingkungan hidup.

Masalah utama dalam kegiatan ini adalah bagaimana potensi dampak lingkungan yang dihasilkan dari unit pengolahan air limbah di Industri Minyak Goreng Surabaya, terutama berhubungan dengan kontribusi terhadap kategori dampak seperti pemanasan global, racun bagi manusia, kualitas ekosistem, dan penggunaan sumber daya. Untuk mengatasi masalah tersebut, kegiatan ini menggunakan pendekatan Penilaian Dampak Siklus Hidup (*Life Cycle Impact Assessment* - LCIA) dengan bantuan perangkat lunak openLCA dan metode *Impact 2002+*. Metode *Impact 2002+* adalah salah satu metode LCIA yang menggabungkan kategori dampak pada tahap *midpoint* dan *endpoint*, sehingga dapat memberikan gambaran menyeluruh tentang kerusakan yang terjadi pada kesehatan manusia, kualitas ekosistem, perubahan iklim, dan penggunaan sumber daya. (Faradina et al., 2023).

Studi literatur menunjukkan bahwa metode LCA dan LCIA sering digunakan untuk mengevaluasi dampak lingkungan dari fasilitas pengolahan air limbah industri. Penelitian yang telah dilakukan sebelumnya menunjukkan bahwa proses pengolahan limbah cair dapat memberikan kontribusi yang penting terhadap kategori dampak seperti pemanasan global, toksisitas manusia, dan ekotoksikitas akuatik, terutama sebagai akibat dari penggunaan energi dan pemakaian bahan kimia. (Patel & Singh, 2022). Dengan demikian, kegiatan ini menjadi salah satu bentuk dari pemanfaatan hasil penelitian yang relevan, serta penerapan konsep ilmiah dalam situasi nyata di lapangan, guna mendukung pengelolaan lingkungan yang lebih berkelanjutan.

METODE PENELITIAN

Metode pengolahan data dalam penelitian ini menggunakan pendekatan *Life Cycle Assessment* (LCA) berdasarkan standar ISO 14040 dan ISO 14044, yang bertujuan untuk menilai dampak lingkungan dari seluruh siklus hidup sistem produksi secara menyeluruh. Pengumpulan data dilakukan melalui observasi langsung dan wawancara dengan operator unit proses, mencakup konsumsi energi, penggunaan bahan kimia, serta aliran input-output dari setiap tahapan produksi. Data yang diperoleh kemudian dimasukkan ke dalam perangkat lunak openLCA untuk dianalisis menggunakan metode karakterisasi Impact 2002+, yang memungkinkan identifikasi kontribusi terhadap berbagai kategori dampak lingkungan seperti *carcinogens*, *respiratory inorganics*, *climate change*, dan lainnya (Pratiwi et al., 2023; Nugroho & Murti, 2024).

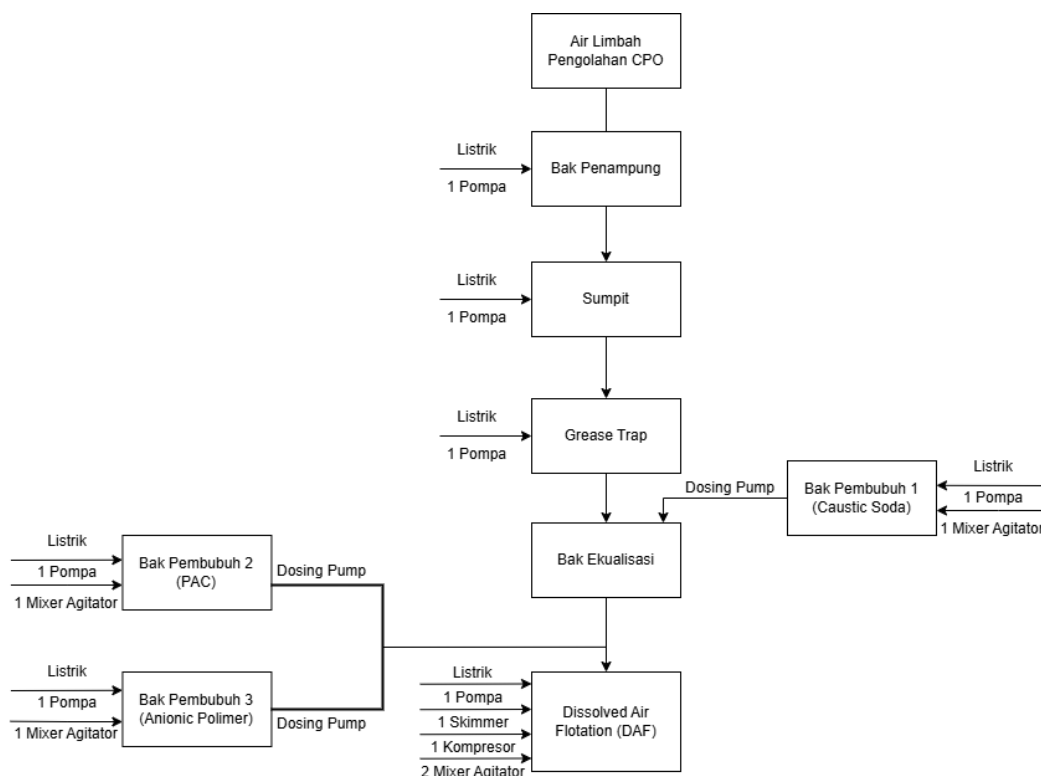
Tahapan analisis LCA meliputi *characterization* dan *single score*. Proses *characterization* dilakukan dengan mengonversi data inventaris menjadi potensi dampak lingkungan berdasarkan faktor karakterisasi dari metode Impact 2002+. Hasil akhir berupa *single score* digunakan untuk menilai total dampak lingkungan dari sistem produksi secara komprehensif. Batasan sistem ditentukan dari hulu hingga unit akhir sebelum distribusi, sehingga mencakup seluruh proses pengolahan limbah dan produksi utama. Metode Impact 2002+ dalam analisis LCA mencakup 15 kategori dampak lingkungan yang digunakan untuk menilai kontribusi sistem terhadap berbagai aspek ekologi dan kesehatan manusia. Kategori-kategori tersebut meliputi *respiratory inorganics*, *aquatic ecotoxicity*, *terrestrial acid/nutri*, *non renewable energy*, *global warming*, *respiratory organics*, *non-carcinogens*, *carcinogens*,

terrestrial ecotoxicity, land occupation, mineral extraction, aquatic eutrophication, ozone layer depletion, dan ionizing radiation. Setiap kategori ini merepresentasikan jenis tekanan lingkungan yang berbeda dan digunakan dalam tahap karakterisasi untuk mengkuantifikasi dampak dari aliran *input* dan *output* dalam sistem produksi. (openLCA.org, 2025).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penentuan Goal and Scope

Penelitian ini berfokus pada analisis sistem *wastewater treatment plant* (WWTP) yang terdiri atas berbagai unit pengolahan. Rangkaian proses dimulai dari bak penampung, sumpit, *grease trap*, bak ekualisasi, DAF, bak pembubuh 1, bak pembubuh 2 dan bak pembubuh 3. Analisis ini bertujuan untuk mengidentifikasi kontribusi terbesar terhadap penggunaan energi, emisi, serta potensi pencemaran yang muncul sepanjang siklus hidup sistem. Sementara itu, cakupan (*scope*) penelitian mencakup penentuan batas sistem (*system boundary*), unit fungsional, serta asumsi-asumsi yang digunakan dalam inventarisasi. (Septiariva et al., 2024).



Gambar 1. Alur Proses WWTP Industri Minyak Goreng Surabaya

Tahapan *Life Cycle Inventory* (LCI)

Tahapan *Life Cycle Inventory* (LCI) mencakup proses sistematis mulai dari identifikasi unit proses, pengumpulan data *input* (energi, bahan baku, air) dan *output* (produk, emisi, limbah), validasi kualitas data, hingga kompilasi inventori dalam basis data standar. LCI berfungsi sebagai fondasi untuk tahap berikutnya yaitu *Life Cycle Impact Assessment* (LCIA), sehingga akurasi dan konsistensi data sangat menentukan hasil analisis. (Sasongko et al., 2023).

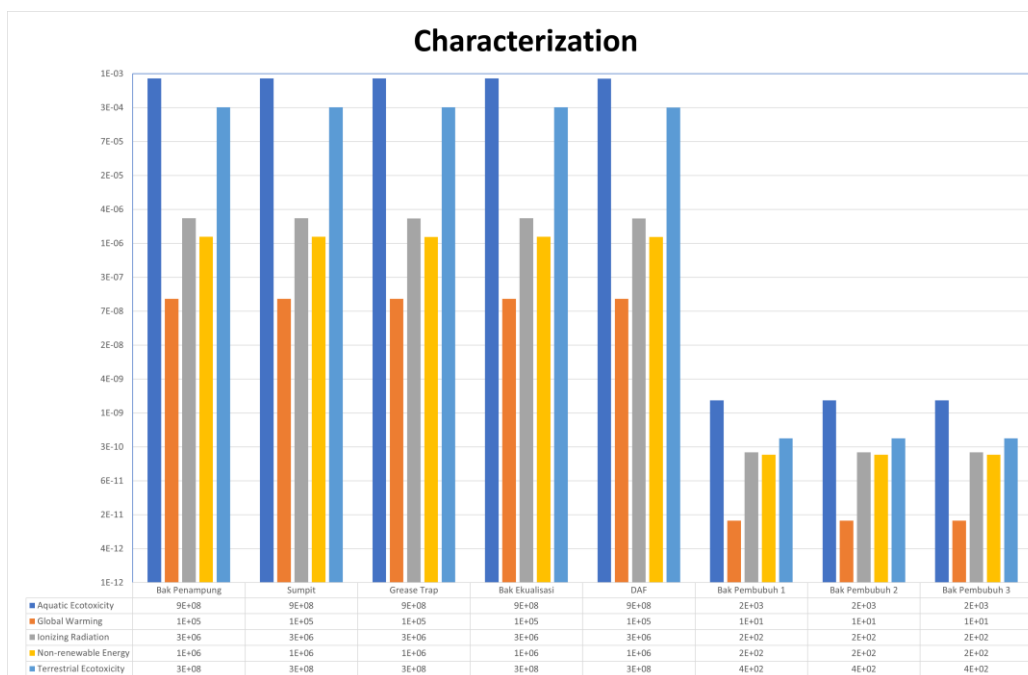
Tabel 1. Inventarisasi Data WWTP Industri Minyak Goreng Surabaya Surabaya

Proses	Input	Jumlah	Satuan
Bak Penampung	Air Limbah	318961	m ³
	Listrik	180	kWh
	COD	4018909	kg
	TSS	2219969	kg
Sumpit	Air Limbah	318961	m ³
	Listrik	180	kWh
	COD	4465454	kg
	TSS	2086005	kg
Grease Trap	Air Limbah	318961	m ³
	COD	3827532	kg
	TSS	2009454	kg
Bak Pembubuh 1	Air	9107	m ³
	<i>Cautic Soda</i>	75	kg
	Listrik	18	kWh
Bak Ekualisasi	Air Limbah	318961	m ³
	Listrik	300	kWh
	COD	3604259	kg
	TSS	1814888	kg
Bak Pembubuh 2	Air	9107	m ³
	<i>Poly Aluminium Chloride (PAC)</i>	250	kg
	Listrik	18	kWh
Bak Pembubuh 3	Air	9107	m ³
	<i>Floculant (Anionic Polimer)</i>	18	kg
	Listrik	18	kWh
Dissolved Air Flotation (DAF)	Air Limbah	318961	m ³
	Listrik	134	kWh
	COD	704904	kg
	TSS	12439	kg

(Sumber : Hasil Analisis Peneliti, 2025)

Life Cycle Impact Assesment (LCIA) dan Interpretation

Tahap *Life Cycle Impact Assessment* (LCIA) merupakan proses yang dilakukan untuk menilai serta memahami tingkat dampak lingkungan dari suatu sistem produk sepanjang rangkaian pengolahannya. Evaluasi ini didasarkan pada data yang telah diperoleh sebelumnya dalam tahap *Life Cycle Inventory* (LCI), sehingga setiap aliran *input* dan *output* dapat dikaitkan dengan potensi dampak lingkungan yang relevan.

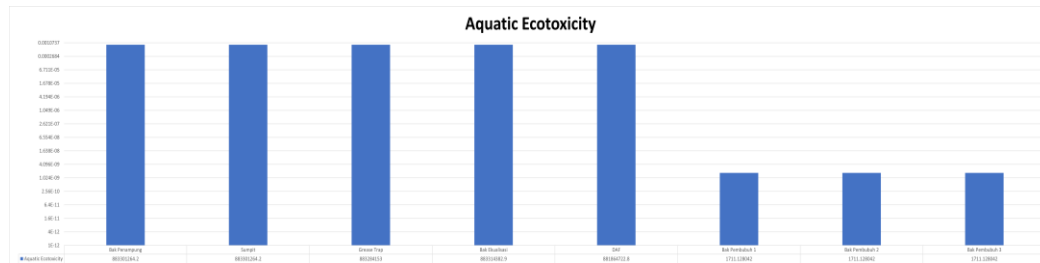


Gambar 1. Grafik Hasil Perbandingan Dampak *Characterization*

Nilai *characterization* merepresentasikan hasil penggabungan berbagai jenis dampak lingkungan ke dalam sejumlah indikator tertentu. Nilai ini menunjukkan kontribusi relatif dari beragam aspek terhadap kategori dampak lingkungan, misalnya emisi gas rumah kaca, pemanfaatan lahan, konsumsi air, maupun pencemaran udara. Pada tahap ini, data awal mengenai emisi serta penggunaan sumber daya dikaitkan dengan indikator dampak spesifik, seperti perubahan iklim, kerusakan lahan, atau kualitas udara. (Rybczewska-Błazejowska & Jezierski, 2024).

Berdasarkan pada hasil LCIA, proses pengolahan air limbah di Industri Minyak Goreng Surabaya menunjukkan adanya dampak lingkungan yang cukup besar. Grafik yang ditampilkan memperlihatkan bahwa kontribusi terbesar berasal dari kategori *aquatic ecotoxicity*, *global warming*, *ionizing radiation*, *non-renewable energy*, *terrestrial ecotoxicity*.

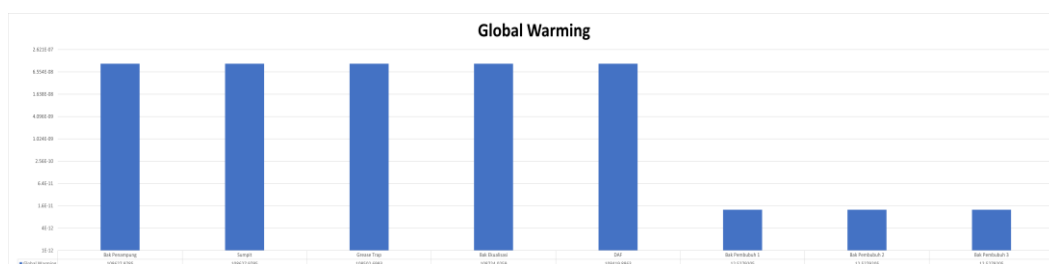
Aquatic Ecotoxicity



Gambar 2. Perbandingan Dampak *Aquatic Ecotoxicity* Tiap Proses

Aquatic ecotoxicity merupakan indikator yang digunakan untuk menilai dampak pencemaran terhadap ekosistem air tawar akibat pelepasan zat beracun ke lingkungan, termasuk ke udara, air, dan tanah. Penilaian ini mempertimbangkan kemampuan senyawa kimia untuk terdegradasi dan menghasilkan metabolit yang bersifat toksik, yang dapat terakumulasi secara biologis dan mengalami biomagnifikasi dalam rantai makanan, terutama pada spesies dengan tingkat trofik yang lebih tinggi. (*Sustainability Directory*, 2024). Zat-zat seperti pestisida, biosida, logam berat, dan obat-obatan dikenal sebagai kontributor utama terhadap dampak ini karena sifatnya yang sangat aktif secara biologis dan berpotensi merusak keseimbangan ekosistem. (US EPA, 2025). Dalam studi ini, analisis *aquatic ecotoxicity* dilakukan pada setiap unit proses dalam sistem pengolahan air limbah (WWTP), dan hasilnya menunjukkan bahwa sebagian besar unit memiliki nilai dampak di atas $6E+08$ kg TEG *water*. Namun, unit seperti bak pembunuh 1, bak pembunuh 2, dan bak pembunuh 3 menunjukkan nilai yang lebih rendah karena debit air yang kecil, sehingga kontribusinya terhadap pencemaran akuatik relatif kecil.

Global Warming

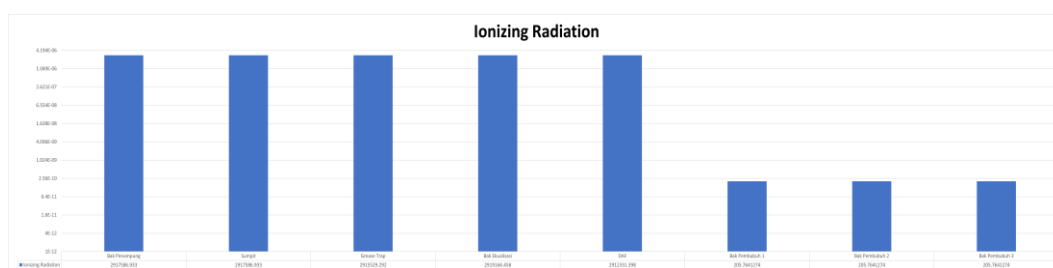


Gambar 3. Perbandingan Dampak *Global Warming* Tiap Proses

Dalam analisis *Life Cycle Impact Assessment* (LCIA), *Global Warming Potential* (GWP) menjadi salah satu kategori dampak utama yang menunjukkan sejauh mana aktivitas atau proses industri berkontribusi terhadap perubahan iklim. Nilai GWP dihitung dengan mengonversi berbagai emisi gas rumah kaca ke dalam CO₂ eq, sehingga dapat dibandingkan secara langsung meskipun sifat dan daya pemanasan gas berbeda. Dengan demikian, hasil GWP memberikan gambaran mengenai tingkat kerusakan iklim yang dihasilkan dari suatu sistem produksi atau pengolahan limbah, dan menjadi dasar penting dalam merumuskan strategi mitigasi emisi. (Putra & Dalimi, 2024).

Berdasarkan hasil analisis *Life Cycle Assessment* (LCA) terhadap sistem Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) Industri Minyak Goreng Surabaya, terlihat bahwa lima unit utama yakni bak penampung, sumpit, grease trap, bak ekualisasi, dan DAF menunjukkan kontribusi yang sangat tinggi terhadap kategori dampak *Global Warming Potential* (GWP), masing-masing berada di kisaran 1.08E+05 kg CO₂ eq. Nilai ini jauh lebih tinggi dibandingkan tiga unit pembubuh (bak pembubuh 1-3) yang hanya menyumbang sekitar 1.26E+01 kg CO₂ eq. Rata-rata keseluruhan unit mencapai sekitar 7E+04 kg CO₂ eq, yang menandakan bahwa sebagian besar emisi gas rumah kaca berasal dari tahapan awal dan tengah proses pengolahan air limbah.

Ionizing Radiation



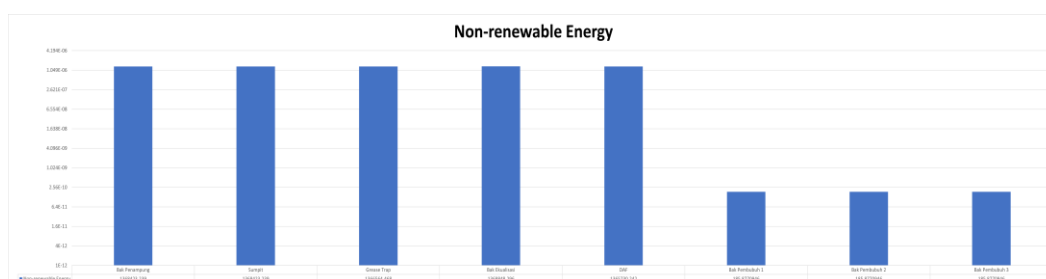
Gambar 4. Perbandingan Dampak *Ionizing Radiation* Tiap Proses

Ionizing radiation merupakan kategori dampak yang digunakan untuk menilai risiko radiasi pengion terhadap manusia dan lingkungan sepanjang siklus hidup suatu produk. Dalam kerangka *Life Cycle Impact Assessment* (LCIA), perhitungan dilakukan dengan mempertimbangkan paparan radionuklida yang dilepaskan ke udara, air, maupun tanah, kemudian dikonversi menjadi potensi gangguan kesehatan (seperti kanker atau mutasi genetik) serta efek terhadap ekosistem. Perkembangan metode LCIA terkini juga menambahkan aspek

produk peluruhan radioaktif (*radioactive progeny*), sehingga hasil analisis di openLCA menjadi lebih menyeluruh dalam menggambarkan ancaman jangka panjang dari radiasi pengion. (Paulillo et al., 2023).

Hasil analisis *Life Cycle Assessment* (LCA) terhadap sistem pengolahan air limbah di Industri Minyak Goreng Surabaya, ditemukan bahwa lima unit utama menyumbang nilai *ionizing radiation* yang sangat besar, masing-masing sekitar $2.9\text{E}+06$ Bq C-14 eq. Sebaliknya, unit pembubuh hanya menghasilkan sekitar $2.05\text{E}+02$ Bq C-14 eq. Nilai rata-rata keseluruhan sistem mencapai $2\text{E}+06$ Bq C-14 eq, yang menunjukkan bahwa sebagian besar potensi radiasi berasal dari konsumsi energi, terutama listrik. Emisi isotop radioaktif seperti karbon-14 dari proses pembangkitan energi menjadi penyebab utama kontribusi ini. Hal ini menekankan pentingnya pengurangan konsumsi energi atau peralihan ke sumber energi rendah emisi dalam sistem IPAL. Menurut standar ISO 14040 dan ISO 14044, kategori *ionizing radiation* dalam LCA digunakan untuk mengukur potensi risiko terhadap kesehatan manusia akibat paparan radiasi sepanjang siklus hidup sistem. Oleh karena itu, hasil ini dapat dijadikan landasan untuk merancang strategi pengelolaan energi yang lebih efisien, memilih teknologi ramah lingkungan, dan mengintegrasikan sumber energi terbarukan dalam operasional IPAL Industri Minyak Goreng Surabaya demi mendukung keberlanjutan lingkungan.

Non-renewable Energy



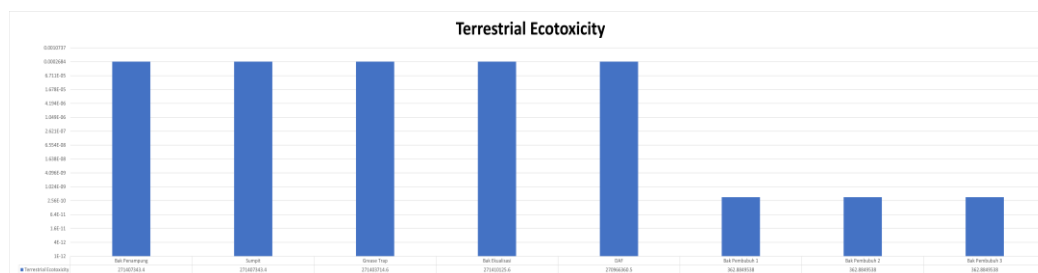
Gambar 5. Perbandingan Dampak *Non-renewable Energy* Tiap Proses

Non-renewable energy menggambarkan penggunaan sumber energi fosil seperti minyak bumi, batu bara, dan gas alam sepanjang siklus hidup produk. Dampak ini berkaitan erat dengan emisi karbon dioksida serta peningkatan jejak lingkungan. Kategori ini menegaskan bahwa ketergantungan pada energi tak terbarukan menjadi penyumbang utama pemanasan

global, sehingga analisis LCIA menyoroti urgensi peralihan menuju energi terbarukan untuk mengurangi dampak jangka panjang. (Idroes et al., 2024).

Hasil analisis *Life Cycle Assessment* (LCA) terhadap sistem Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) Industri Minyak Goreng Surabaya menunjukkan bahwa konsumsi energi tak terbarukan cukup dominan, dengan nilai rata-rata mencapai sekitar $9E+05$ MJ *primary* per unit. Unit-unit utama seperti bak penampung, sumpit, grease trap, bak ekualisasi, dan DAF mencatat penggunaan energi yang jauh lebih tinggi dibandingkan unit pembubuh, yang hanya menyumbang sekitar 185 MJ *primary*. Energi tak terbarukan ini umumnya berasal dari sumber seperti batubara, minyak bumi, dan gas alam, yang digunakan dalam proses produksi bahan kimia, transportasi, serta pasokan listrik untuk operasional IPAL.

Terrestrial Ecotoxicity



Gambar 6. Perbandingan Dampak *Terrestrial Ecotoxicity* Tiap Proses

Terrestrial ecotoxicity menilai potensi bahaya zat kimia beracun terhadap ekosistem darat, termasuk tanah dan organisme yang hidup di dalamnya. Perhitungan dilakukan dengan mempertimbangkan distribusi, transformasi, serta paparan zat kimia yang kemudian dikonversi menjadi kerusakan ekosistem. Penelitian mutakhir menunjukkan bahwa pelepasan logam berat maupun senyawa organik berbahaya dari berbagai tahap siklus hidup produk dapat menimbulkan kerusakan biodiversitas darat, sehingga kategori ini semakin relevan dalam mendukung strategi pengelolaan bahan kimia yang berkelanjutan. (Wang & Sinha, 2021).

Berdasarkan hasil analisis *Life Cycle Assessment* (LCA) terhadap sistem Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) Industri Minyak Goreng Surabaya, diperoleh bahwa potensi dampak lingkungan dalam kategori *terrestrial ecotoxicity* tergolong tinggi, dengan nilai rata-rata mencapai sekitar $2E+08$ kg TEG soil per unit. Unit-unit utama seperti bak penampung, sumpit, grease trap, bak ekualisasi, dan DAF menunjukkan kontribusi yang sangat besar

terhadap pencemaran tanah akibat zat toksik, masing-masing berada di kisaran $2.7E+08$ kg TEG soil. Sebaliknya, unit pembubuh hanya menyumbang sekitar 362 kg TEG soil. Kategori ini mengukur potensi racun terhadap organisme tanah akibat pelepasan logam berat, senyawa kimia, dan residu industri sepanjang siklus hidup sistem.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil kajian terhadap sistem pengolahan air limbah di Industri Minyak Goreng Surabaya menggunakan metode Impact 2002+, diketahui bahwa analisis berfokus pada lima kategori utama dampak lingkungan, yaitu *aquatic ecotoxicity*, *global warming*, *ionizing radiation*, *non-renewable energy*, dan *terrestrial ecotoxicity*. Dari seluruh unit proses yang dianalisis, bak pembubuh menunjukkan kontribusi dampak lingkungan paling rendah, sehingga dapat dianggap sebagai unit yang paling efisien secara ekologis dalam sistem IPAL tersebut. Sebaliknya, unit-unit seperti bak penampung, sumpit, grease trap, bak ekualisasi, dan DAF memberikan kontribusi dampak yang jauh lebih besar, terutama dalam kategori energi tak terbarukan dan pemanasan global.

Sebagai respon terhadap tingginya dampak lingkungan dari beberapa unit proses, salah satu rekomendasi teknis yang dapat diterapkan adalah transisi menuju sumber energi yang lebih ramah lingkungan dan dapat diperbaharui. Pemanfaatan energi surya melalui instalasi panel surya menjadi salah satu alternatif yang relevan, mengingat potensi sinar matahari di wilayah Surabaya cukup tinggi sepanjang tahun. Selain itu, pendekatan ini sejalan dengan prinsip efisiensi energi dan dekarbonisasi yang menjadi fokus dalam pengelolaan lingkungan industri modern. Implementasi teknologi energi terbarukan tidak hanya berpotensi menurunkan emisi gas rumah kaca, tetapi juga mendukung pencapaian target keberlanjutan jangka panjang dalam sektor pengolahan air limbah.

DAFTAR PUSTAKA

- Faradina, R., Afiuddin, A. E., & Sophia, A. V. (2023). Kajian Life Cycle Assessment Pengolahan Air di IPAM Ngagel II Surabaya dengan Metode IMPACT 2002+ Endpoint. In Conference Proceeding on Waste Treatment Technology (Vol. 6, No. 1).
- Idroes, G. M., Hardi, I., Rahman, M. H., Afjal, M., Noviandy, T. R., & Idroes, R. (2024). The dynamic impact of non-renewable and renewable energy on carbon dioxide emissions and ecological footprint in Indonesia. *Carbon Research*, 3(1), 35.

- Nugroho, G. G., & Murti, R. H. A. (2024). Analisis Dampak Lingkungan Proses Pengolahan Air Limbah Bandar Udara X Menggunakan Metode Life Cycle Assesment. *JURNAL WILAYAH, KOTA DAN LINGKUNGAN BERKELANJUTAN*, 3(1), 142-149.
- Patel, K., & Singh, S. K. (2022). A life cycle approach to environmental assessment of wastewater and sludge treatment processes. *Water and Environment journal*, 36(3), 412-424.
- Paulillo, A., McKone, T. E., & Fantke, P. (2023). Characterizing human health damage from ionizing radiation in life cycle assessment. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 28(12), 1723-1734.
- Pratiwi, S. W., & Nisa, S. Q. Z. (2023). Life Cycle Assessment (LCA) Proses Pengolahan Air Limbah Domestik di Perusahaan Galangan Kapal. *Envirous*, 4(1), 73-79.
- Putra, S. I., & Dalimi, R. (2024). Global Warming Potential from the Life Cycle of Fischer-Tropsch Fuel from Carbon Capture for Passenger Cars in Jakarta. *International Journal of Electrical, Computer, and Biomedical Engineering*, 2(1), 19-47.
- Rybczewska-Błażejowska, M., & Jezierski, D. (2024). Comparison of ReCiPe 2016, ILCD 2011, CML-IA baseline and IMPACT 2002+ LCIA methods: a case study based on the electricity consumption mix in Europe. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 29(10), 1799-1817.
- Sasongko, N. A., Ariyanto, N., Putri, V. Z. E., Subagyo, H., Siswanto, et al. (2023). National Platform of Life Cycle Inventory Database in Indonesia. *ASEAN Journal of Systems Engineering*.
- Septiariva, I. Y., Suhardono, S., Indawati, L., Suryawan, I. W. K., Wahyudi, A. H., & Solichin, S. (2024). Life Cycle Environmental Implications of Wastewater Treatment at an Academic Institution. *Journal of Ecological Engineering*, 25(5), 389-403.
- Sustainability Directory. (2025). Aquatic Ecotoxicity → Fundamentals. Retrieved Desember 1, 2025, from <https://sustainability-directory.com/fundamentals/aquatic-ecotoxicity-fundamentals/>
- US Environmental Protection Agency. (2025). Ecotoxicology (ECOTOX) Knowledgebase Resource Hub. Retrieved December 1, 2025, from <https://www.epa.gov/comptox-tools/ecotoxicology-ecotox-knowledgebase-resource-hub>

Wang, S., & Sinha, R. (2021). Life cycle assessment of different prefabricated rates for building construction. *Buildings*, 11(11), 552.