

Analisis Siklus Hidup Biodiesel Berbahan Baku Minyak Goreng Bekas Menggunakan Katalis Lumpur Merah (*Red Mud*) dari Limbah Pertambangan Bauksit

Habib Aulia Hakim¹, Muflih Arisa Adnan¹, dan Arif Hidayat^{2*}

¹Program Studi Teknik Kimia Program Sarjana, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Indonesia

²Program Studi Teknik Kimia Program Magister, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Indonesia; e-mail: 005220101@uii.ac.id

ABSTRAK

Produksi biodiesel dari minyak goreng bekas (Waste Cooking Oil/WCO) berpotensi mendukung pengelolaan limbah dan transisi energi berkelanjutan, namun tetap dapat menimbulkan dampak lingkungan yang signifikan. Penelitian ini menganalisis dampak lingkungan produksi biodiesel WCO menggunakan katalis heterogen lumpur merah (red mud) dari limbah pertambangan bauksit melalui pendekatan Life Cycle Assessment (LCA) cradle-to-gate dengan unit fungsional 1.000 kg biodiesel per hari. Sistem mencakup pengumpulan bahan baku, transportasi, perlakuan awal, sintesis katalis, dan transesterifikasi, dengan beban lingkungan pembentukan kedua bahan baku limbah diasumsikan nol (zero-burden). Penilaian dampak menggunakan metode Eco-indicator 99 (E) V2.10/Europe EI 99 E/A pada perangkat lunak SimaPro. Hasil menunjukkan bahwa transesterifikasi menjadi hotspot utama pada sebagian besar kategori dampak midpoint, antara lain karsinogen (43,9%), bahan anorganik pernapasan (46,1%), perubahan iklim (38,2%), dan toksisitas ekologi (40,7%), yang dipengaruhi oleh penggunaan metanol, konsumsi energi listrik dan panas, dan potensi pelepasan residu bahan kimia. Pada tingkat endpoint, transesterifikasi juga dominan pada kerusakan kesehatan manusia (45,3%), kualitas ekosistem (37,2%), dan penggunaan sumber daya (34,7%). Praperlakuan WCO menjadi hotspot sekunder pada toksisitas ekologi dan bahan anorganik pernapasan, sedangkan transportasi bahan baku berkontribusi signifikan pada asamifikasi/eutrofikasi akibat jarak angkut yang panjang. Penelitian ini berfokus pada identifikasi hotspot dan peluang perbaikan sistem yang dikaji. Mitigasi yang direkomendasikan meliputi optimalisasi efisiensi energi transesterifikasi, pemulihan dan daur ulang metanol, integrasi energi terbarukan, dan penguatan pengumpulan bahan baku terdesentralisasi.

Kata kunci: biodiesel, minyak goreng bekas, *life cycle assessment*, *eco-indicator 99*, lumpur merah (*red mud*), dampak lingkungan, keberlanjutan

ABSTRACT

The production of biodiesel from waste cooking oil (WCO) offers potential for waste management and the transition toward sustainable energy, yet it may still generate considerable environmental impacts. This study assesses the environmental impacts of WCO-based biodiesel production using a red mud (bauxite residue) heterogeneous catalyst through a cradle-to-gate Life Cycle Assessment (LCA) with a functional unit of 1,000 kg of biodiesel per day. The system covers raw material collection, transportation, pretreatment, catalyst synthesis, and transesterification, with the environmental burden of generating both waste feedstocks assumed to be zero (zero-burden). Impacts were evaluated using the Eco-indicator 99 (E) V2.10/Europe EI 99 E/A method in SimaPro. Midpoint results show that transesterification is the primary hotspot for most impact categories, including carcinogens (43.9%), respiratory inorganics (46.1%), climate change (38.2%), and ecotoxicity (40.7%), driven by methanol consumption, electricity and thermal energy demand, and potential chemical residue release. At the endpoint level, transesterification also dominates damage to human health (45.3%), ecosystem quality (37.2%), and resources (34.7%). WCO pretreatment is a secondary hotspot for ecotoxicity and respiratory inorganics, while raw material transportation contributes significantly to acidification/eutrophication due to long hauling distances. This study focuses on identifying hotspots and improvement opportunities within the studied system. Recommended mitigation strategies include optimizing energy efficiency in transesterification, implementing methanol recovery and recycling, integrating renewable energy, and strengthening decentralized feedstock collection.

Keywords: biodiesel, waste cooking oil, life cycle assessment, eco-indicator 99, red mud, environmental impact, sustainability

Citation: Hakim, H. A., Adnan, M. A., dan Hidayat, A. (2026). Analisis Siklus Hidup Biodiesel Berbahan Baku Minyak Goreng Bekas Menggunakan Katalis Lumpur Merah (*Red Mud*) dari Limbah Pertambangan Bauksit. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 24(5), 1235-1246, doi:10.14710/jil.24.5.1235-1246

1. PENDAHULUAN

Bahan bakar fosil telah lama lebih diutamakan daripada sumber energi terbarukan untuk memenuhi permintaan energi yang terus meningkat, yang didorong oleh pertumbuhan populasi yang cepat dan perluasan berbagai sektor, karena bahan bakar fosil mampu menghasilkan jumlah energi yang besar dengan masukan sumber daya yang relatif kecil. Selain itu, minyak dan gas dapat diangkut secara efisien melalui sistem pipa untuk jarak jauh dan mudah diakses secara luas (Guo et al., 2016). Peningkatan pesat emisi CO₂ dan ketidakmampuan untuk memenuhi Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs) yang disepakati oleh PBB menuntut upaya substitusi yang signifikan (Nunes, 2023). Untuk mengatasi tantangan ini, penting untuk memahami proses produksi energi, ketersediaan bahan baku dan katalis, serta dampaknya terhadap lingkungan. Biodiesel memungkinkan pemerintah untuk mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil impor. Selain itu, biodiesel juga memberikan sumber pendapatan tambahan bagi sektor pertanian dan meningkatkan kualitas lingkungan dengan menghasilkan emisi polutan yang lebih rendah, termasuk pengurangan emisi karbon bersih sebesar 74% dibandingkan dengan bahan bakar fosil (Alternative Fuels Data Center, 2014).

Biodiesel adalah sumber energi terbarukan yang dihasilkan dari minyak nabati atau lemak hewan. Biodiesel bersifat non-toksik, mudah terurai secara alami, dan menghasilkan emisi sulfur dan hidrokarbon yang lebih rendah ke atmosfer. Selain itu, biodiesel dapat digunakan pada mesin diesel yang memenuhi standar teknis yang dipersyaratkan (Baskar et al., 2018).

Biodiesel terdiri dari senyawa berupa campuran ester monoalkil dan asam lemak rantai panjang. Senyawa-senyawa ini dihasilkan melalui reaksi antara trigliserida dari minyak atau lemak dengan alkohol rantai pendek, seperti metanol atau etanol, dalam kehadiran katalis. Proses ini dikenal sebagai transesterifikasi (Sander et al., 2018).

Sekitar 75% produksi biodiesel masih bergantung pada tanaman pangan. Akibatnya, meningkatnya kebutuhan akan bahan baku generasi pertama memicu kenaikan harga pangan dan berpotensi mengganggu ketahanan pangan. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, minyak nabati secara bertahap mulai digantikan oleh bahan baku generasi kedua, seperti minyak non-pangan dan minyak limbah. Minyak goreng bekas (*Waste Cooking Oil/WCO*) telah dikenal secara luas sebagai bahan baku biodiesel yang ekonomis sekaligus ramah lingkungan di berbagai negara (Uzun et al., 2012). Perlu diperhatikan bahwa pembuangan minyak goreng bekas (WCO) ke dalam ekosistem tanah dan perairan dapat menimbulkan dampak lingkungan yang serius. Di sisi lain, mengingat kandungan energinya yang tinggi, pengelolaan WCO yang tidak tepat juga dapat menyebabkan hilangnya potensi

sumber daya (Hosseinzadeh-Bandbafha et al., 2022). Dengan demikian, konversi minyak goreng bekas (WCO) menjadi biodiesel dapat dianggap sebagai pendekatan yang berkelanjutan, baik dalam pengelolaan WCO maupun dalam produksi bahan bakar hayati yang terbarukan.

Sebagaimana telah diuraikan sebelumnya, penggunaan katalis kimia menjadi salah satu tantangan utama dalam produksi biodiesel. Proses transesterifikasi berlangsung lambat dan menghasilkan rendemen yang rendah apabila dilakukan tanpa katalis (Sharma et al., 2018). Keberadaan katalis berperan penting dalam meningkatkan laju reaksi menuju kesetimbangan dengan menurunkan energi aktivasi yang dibutuhkan (Quah et al., 2019). Dalam praktik industri, transesterifikasi umumnya menggunakan katalis basa homogen (Gad et al., 2021), namun penggunaannya memiliki sejumlah keterbatasan serius, seperti pembentukan sabun serta dihasilkannya limbah cair dalam jumlah besar pada tahap pemurnian biodiesel (Hosseinzadeh-Bandbafha et al., 2022). Untuk mengatasi kendala tersebut, katalis heterogen diusulkan sebagai alternatif dalam produksi biodiesel karena dapat digunakan kembali dalam beberapa siklus reaksi (Hamza et al., 2021). Selain itu, katalis heterogen mampu mentoleransi bahan baku minyak berkualitas rendah, seperti minyak goreng bekas (WCO), yang umumnya memiliki kandungan asam lemak bebas (FFAs) dan air yang tinggi (Endalew et al., 2011). Penggunaan katalis ini juga menghilangkan kebutuhan proses pencucian dalam memperoleh biodiesel murni (Hosseinzadeh-Bandbafha et al., 2022). Meskipun memiliki berbagai keunggulan, katalis heterogen komersial konvensional masih diproduksi dari sumber daya tak terbarukan. Oleh karena itu, berbagai upaya telah dilakukan untuk mengembangkan katalis heterogen terbarukan berbasis biomassa maupun limbah industri guna meningkatkan keberlanjutan dan karakter ramah lingkungan dalam produksi biodiesel. Tinjauan terbaru oleh (Ghosh et al., 2024) turut menegaskan bahwa integrasi analisis siklus hidup ke dalam pengembangan katalis heterogen untuk biodiesel WCO masih menjadi area penelitian yang perlu diperluas.

Katalis yang digunakan dalam penelitian ini adalah lumpur merah (*red mud*), yang berasal dari limbah atau sisa pembuangan yang dihasilkan selama pengolahan bauksit untuk produksi alumina. Lumpur merah mengandung komponen utama seperti Fe₂O₃ (48,89%), Al₂O₃ (29,00%), dan SiO₂ (18,10%). Kandungan alumina dan silika yang tinggi dalam lumpur merah memungkinkan penggunaannya secara efektif sebagai katalis dalam proses transesterifikasi (Dawam, 2017). Katalis lumpur merah dipilih karena merupakan limbah industri yang berpotensi menyebabkan polusi lingkungan; penggunaannya sebagai katalis membantu mengurangi dampak negatifnya terhadap lingkungan. Selain itu, katalis

lumpur merah memiliki stabilitas termal dan mekanik yang baik, sehingga mampu bertahan dalam kondisi reaksi yang ekstrem. Struktur porusnya juga membuatnya efektif sebagai pendukung KOH, memungkinkan spesies aktif menempel dengan mudah pada permukaan katalis. Selain itu, katalis ini relatif lebih murah dibandingkan dengan katalis konvensional. Berbagai penelitian terbaru turut mengonfirmasi potensi katalitik lumpur merah pada beragam reaksi berbasis minyak nabati, antara lain sebagai katalis dekarboksilasi minyak nabati menjadi diesel hijau (Adzahar et al., 2022), katalis alkali dari larutan sisa proses *Bayer* untuk esterifikasi WCO (Barbosa et al., 2023), serta katalis pengolahan limbah cair biodiesel (Yu et al., 2025); tinjauan komprehensif terbaru mengenai preparasi katalis berbasis lumpur merah turut dirangkum oleh (Zhuang et al., 2025). Meskipun berbagai penelitian sebelumnya melaporkan hasil yang menjanjikan terkait penggunaan katalis limbah bauksit, aspek lingkungan dari katalis inovatif ini dalam produksi biodiesel masih belum dikaji secara mendalam. Perlu ditekankan bahwa sebelum produk berbasis *bio* dipasarkan dan diperkenalkan untuk bersaing dengan produk berbasis fosil dan/atau non-terbarukan, tingkat keberlanjutan lingkungannya harus dievaluasi secara komprehensif guna meningkatkan kepercayaan dan minat konsumen dalam menggunakannya.

Analisis Siklus Hidup (*Life Cycle Assessment/LCA*) merupakan metode yang diakui secara internasional dan bersifat sistematis untuk mengevaluasi serta menganalisis dampak lingkungan dan tingkat keberlanjutan suatu produk atau proses sepanjang siklus hidupnya. Metode ini menilai konsekuensi lingkungan mulai dari tahap produksi hingga pemanfaatan, sehingga memungkinkan perbandingan beban lingkungan secara menyeluruh. LCA telah banyak diterapkan untuk menilai dan membandingkan keberlanjutan lingkungan antara produk berbasis *bio* dan produk berbasis fosil. Sejumlah studi sebelumnya juga menekankan peran katalis terhadap dampak lingkungan biodiesel berbasis minyak goreng bekas (WCO) serta merekomendasikan adanya kajian lanjutan terhadap penggunaan katalis alternatif.

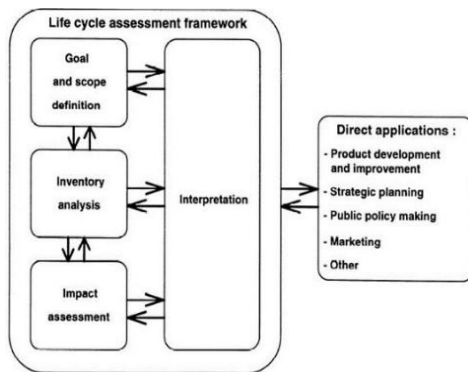
Kebaruan penelitian ini terletak pada integrasi LCA berpendekatan *cradle-to-gate* yang mencakup seluruh rantai produksi biodiesel dari WCO, termasuk tahap sintesis katalis heterogen dari limbah pertambangan bauksit (lumpur merah), sebagai satu kesatuan sistem produksi yang sejauh penelusuran literatur belum dikaji pada studi terdahulu. Penelitian oleh Hidayat et al. (2020) hanya berfokus pada optimasi kondisi sintesis dan karakterisasi katalis

KOH/*red mud* tanpa melakukan analisis dampak lingkungan (Hidayat et al., 2020). Penelitian yang dilakukan Alanis et al. (2022) mengkaji strategi LCA untuk biodiesel WCO namun menggunakan katalis heterogen berbasis campuran besi dan CaO, bukan limbah pertambangan (Alanis et al., 2022). Studi terkait LCA pada produksi biodiesel dari WCO dengan katalis bifungsional $\text{CaO-Fe}_3\text{O}_4$ yang bukan katalis berbasis limbah pertambangan telah dilakukan oleh Phang et al. (2026) (Phang et al., 2026). Pada penelitian tersebut dilakukan perbandingan dengan pemakaian katalis homogen dan bahan baku dari minyak nabati murni sebagai baseline. Sedangkan Musharavati et al. (2023) membandingkan biodiesel WCO dengan biodiesel sawit tanpa mengkaji dampak lingkungan dari tahap sintesis katalis limbah secara spesifik (Musharavati et al., 2023). Dengan demikian, penelitian ini akan melengkapi celah pengetahuan mengenai dampak lingkungan spesifik dari valorisasi limbah bauksit sebagai katalis dalam rantai produksi biodiesel WCO secara menyeluruh, dari pengumpulan bahan baku hingga produk akhir biodiesel.

Tujuan utama penelitian ini adalah melakukan penilaian siklus hidup (*Life Cycle Assessment/LCA*) terhadap proses produksi biodiesel yang memanfaatkan limbah bauksit (lumpur merah) sebagai bahan baku sintesis katalis dan minyak goreng bekas (WCO) sebagai bahan baku minyak, dengan bantuan perangkat lunak simulasi SimaPro. Titik-titik panas (*hotspot*) lingkungan dalam sistem produksi biodiesel dianalisis secara menyeluruh pada tingkat *midpoint* dan *endpoint*, dan hasilnya digunakan untuk merumuskan rekomendasi strategi mitigasi guna menurunkan dampak lingkungan sistem yang dikaji. Penelitian ini bertujuan untuk menyediakan informasi yang relevan dan mendukung pemahaman yang lebih komprehensif dalam proses pengambilan keputusan menuju opsi yang berkelanjutan, khususnya dalam mendukung Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (*Sustainable Development Goals/SDG*) 7, yaitu Energi Bersih dan Terjangkau, dan memberikan kontribusi bagi pengembangan dan investasi di industri produksi biodiesel.

2. METODE PENELITIAN

Studi LCA ini merujuk pada pedoman ISO 14040-2016 dan ISO 14044 2017. Studi ini juga didasarkan pada pedoman untuk menyusun laporan penilaian siklus hidup yang diterbitkan oleh Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan pada tahun 2021. LCA terdiri dari empat tahap utama: penetapan tujuan dan ruang lingkup, analisis inventaris siklus hidup, penilaian dampak siklus hidup, dan interpretasi. Diagram langkah LCA ditujukan pada Gambar 1.



Gambar 1. Bagan Tahapan LCA (SNI ISO 14040, 2016)

Perangkat lunak pemrosesan data *SimaPro* 10.2.0.3 dengan Lisensi Akademik dan basis data *Eco-indicator 99 (E) V2.10 / Europe EI 99 E/A* digunakan untuk mengevaluasi dampak lingkungan. Perangkat lunak ini dipilih memungkinkan pengguna untuk menambahkan atau mengubah basis data yang diperlukan untuk memulan pengumpulan data.

2.1. Tujuan dan Ruang Lingkup

Tujuan dan ruang lingkup ditentukan terlebih dahulu, diikuti dengan penyusunan daftar kegiatan yang kemungkinan besar akan mempengaruhi lingkungan terkait dengan suatu proses atau produk tertentu. Tahap penetapan tujuan dan ruang lingkup menetapkan kerangka kerja dan rencana kerja untuk seluruh penilaian siklus hidup. Penelitian LCA ini berfokus pada aspek keberlanjutan lingkungan secara keseluruhan dan kesehatan manusia dalam produksi biodiesel WCO yang didukung oleh katalis limbah bauksit. Studi ini menggunakan pendekatan *cradle-to-gate*, mulai dari pengumpulan bahan baku hingga transesterifikasi biodiesel.

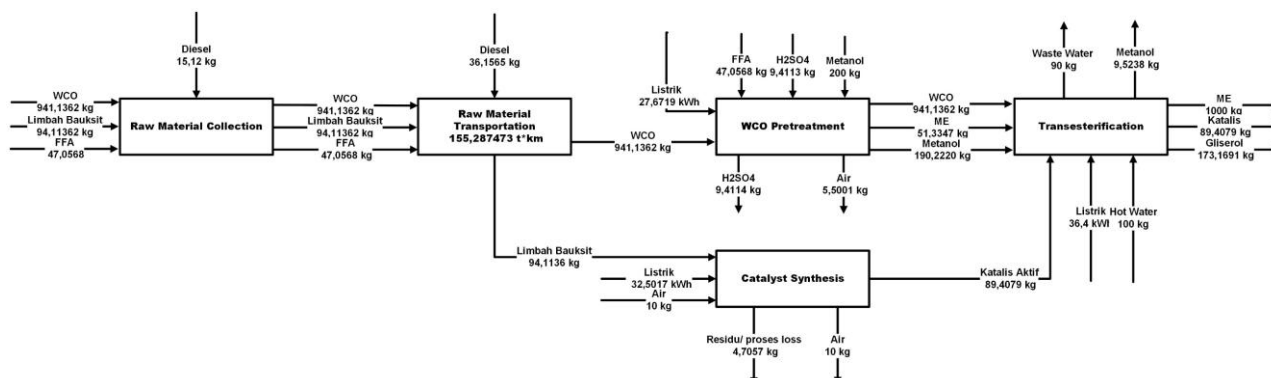
Untuk transesterifikasi, unit fungsional yang digunakan dalam studi ini adalah 1.000 kg biodiesel yang diproduksi setiap hari. Beberapa asumsi yang dibuat untuk studi LCA dalam studi ini didasarkan pada tujuan yang telah ditetapkan:

- Dua bahan baku yang diperlukan untuk produksi biodiesel, yaitu WCO dan limbah bauksit yang dikumpulkan dari dua pusat distribusi.
- Jarak total yang ditempuh untuk mengumpulkan WCO dan limbah bauksit dari pusat distribusi masing-masing ke fasilitas pretreatment minyak dan pabrik produksi biodiesel diasumsikan sebesar 150 km untuk setiap tahap (total 300 km). Nilai ini merupakan skenario ilustratif yang merepresentasikan jarak logistik menengah antara sentra pengumpulan WCO di kawasan perkotaan dan fasilitas pengolahan limbah bauksit, dan bukan berdasarkan studi kasus pabrik eksisting. Karena beban lingkungan dari aktivitas

transportasi dihitung berbasis ton-kilometer ($t \cdot km$), kontribusi transportasi terhadap hasil bersifat proporsional linier terhadap jarak tempuh yang diasumsikan.

- Fasilitas pra pengolahan minyak diasumsikan berada dekat dengan pabrik produksi biodiesel; oleh karena itu jarak transportasi antara kedua fasilitas diabaikan.
- Proses penyaringan dan pengendapan minyak diasumsikan telah selesai di pusat distribusi WCO, sehingga tidak dipertimbangkan dalam studi LCA ini.
- Seluruh proses produksi biodiesel diasumsikan sebagai proses *batch*, mengingat *reactor batch* dapat mencapai tingkat konversi yang tinggi.
- Beban lingkungan dari proses pembentukan kedua bahan baku limbah (WCO dan limbah bauksit) diasumsikan nol (pendekatan *zero-burden/cut-off*), karena keduanya berstatus sebagai produk sisa (*waste*) tanpa nilai ekonomi pada titik asal sebelum dikumpulkan, mengikuti praktik yang umum digunakan pada studi LCA biodiesel berbahan baku limbah (Hosseinzadeh-Bandbafha et al., 2022). Batas sistem (system boundary) dengan demikian dimulai pada titik pengumpulan (*raw material collection*) kedua bahan baku tersebut, tidak termasuk beban dari proses penggorengan yang menghasilkan WCO maupun proses *Bayer* yang menghasilkan lumpur merah..

Perlu diperhatikan bahwa pembagian beban lingkungan pada sistem multi-produk, seperti sistem produksi biodiesel, dapat dilakukan dengan berbagai pendekatan, antara lain berdasarkan massa, energi, atau nilai ekonomi. Dalam penelitian ini, pendekatan alokasi massa digunakan untuk mendistribusikan beban lingkungan antara dua produk bernilai tambah, yaitu biodiesel dan gliserol. Dari total keluaran *co-product* transesterifikasi sebesar 1.173,17 kg per ton biodiesel (1.000 kg metil ester + 173,17 kg gliserol), alokasi massa mendistribusikan beban lingkungan secara proporsional terhadap rasio massa masing-masing produk, yaitu 85,2% untuk biodiesel dan 14,8% untuk gliserol. Alokasi massa dipilih karena data massa produk diketahui secara pasti dari neraca massa proses berbeda dengan data harga pasar gliserol yang fluktuatif (diperlukan untuk alokasi ekonomi) atau data nilai kalor pembakaran yang memerlukan pengukuran tambahan (diperlukan untuk alokasi energi) dan merupakan pendekatan yang paling umum digunakan pada studi LCA biodiesel dari WCO. Gambar 2 menggambarkan diagram alir komprehensif yang menunjukkan batas proses bisnis rinci produksi biodiesel WCO yang memanfaatkan katalis yang dihasilkan dari limbah bauksit.



Gambar 2. Diagram Alir yang Menggabungkan Batas Proses Bisnis Terperinci dari Biodiesel WCO yang diproduksi Menggunakan Katalis dari Limbah Pertambangan

2.2. Analisis Inventarisasi Siklus Hidup

Tahap inventarisasi siklus hidup memegang peranan penting dalam memastikan terkumpulnya data yang berkualitas, akurat, dan representatif. Tahap ini mencakup pengumpulan data primer dan sekunder sepanjang seluruh siklus hidup. Data primer diperoleh dari data operasional melalui pemantauan langsung proses dan kemudian digunakan sebagai masukan langsung ke dalam perangkat lunak, meskipun beberapa data perlu dikonversi terlebih dahulu sebelum dimasukkan. Data inventarisasi yang dikumpulkan harus meliputi bahan baku, energi (bahan bakar dan listrik), bahan kimia, air, penggunaan lahan, serta emisi yang mencakup gas rumah kaca, limbah konvensional, limbah cair, limbah padat, limbah beracun, dan limbah berbahaya.

Sumber data pada penelitian ini terdiri atas tiga jenis. Pertama, data primer berupa neraca massa proses yang dirancang pada penelitian ini, mencakup massa WCO, FFA, dan limbah bauksit yang dikumpulkan; kebutuhan metanol dan asam sulfat pada tahap pretreatment; kebutuhan katalis dan metanol pada tahap transesterifikasi; kebutuhan air proses dan air panas; dan hasil produk (metil ester, gliserol, katalis aktif) sebagaimana disajikan pada Tabel 1. Kedua, data sekunder dari literatur ilmiah, yaitu kondisi optimum sintesis katalis lumpur merah mengacu pada (Hidayat et al., 2020), ambang kandungan FFA <3% dan kebutuhan tahap esterifikasi asam mengacu pada (Chung et al., 2019), dan karakteristik kimia lumpur merah mengacu pada (Dawam, 2017). Ketiga, data proses background dari basis data SimaPro 10.2.0.3 (*Ecoinvent*), yaitu produksi metanol, produksi asam sulfat, pembangkitan listrik grid, dan pembakaran bahan bakar diesel untuk transportasi, karena tidak tersedia data primer untuk proses hulu (*upstream*) tersebut.

2.2.1. Pengumpulan dan Pengangkutan Bahan Baku

Dua bahan baku yang diperlukan untuk produksi biodiesel, yaitu WCO dan limbah bauksit, dikumpulkan dari dua pusat distribusi yang berbeda. Limbah bauksit tersedia secara luas di area

pertambangan, sedangkan WCO melimpah di dekat populasi perkotaan. Transportasi hanya mencakup jarak dari fasilitas pra pengolahan minyak dan pabrik produksi biodiesel ke pusat distribusi WCO dan limbah bauksit, yang diasumsikan berjarak total 300 km. Oleh karena itu, jarak transportasi untuk masing-masing bahan baku diestimasi sekitar 150 km. Fasilitas pra pengolahan minyak diasumsikan berada dekat dengan pabrik produksi biodiesel; oleh karena itu, LCA tidak mempertimbangkan tanggung jawab transportasi ini. Diasumsikan bahwa truk angkutan dengan kapasitas 3,5-7,5 ton digunakan untuk transportasi, mempertimbangkan berat kedua bahan baku yang dikumpulkan. Laju konsumsi bahan bakar rata-rata untuk truk dipertimbangkan 28 L solar/100 km. Kepadatan solar yang digunakan dalam studi ini diasumsikan sebesar 0,84 kg/L.

2.2.2. Pretreatment Minyak Goreng Bekas

Pretreatment WCO sangat penting dalam produksi biodiesel karena kandungan FFAs yang tinggi (3%) dalam WCO (Chung et al., 2019). Secara umum, pengabaian tahap pretreatment pada minyak dengan kandungan asam lemak bebas (*free fatty acids*/FFA) yang tinggi dapat menyebabkan pembentukan sabun, menurunkan laju reaksi, serta menyulitkan pemisahan produk akhir. Pada tahap ini, metanol dan asam sulfat ditambahkan ke dalam WCO untuk memicu reaksi esterifikasi dan menurunkan kadar FFA hingga di bawah 3%. Jumlah metanol dan asam sulfat yang diperlukan untuk reaksi esterifikasi asam satu langkah masing-masing adalah 200 dan 9,4114 kg per ton biodiesel.

2.2.3. Sintesis Katalis

Data untuk analisis LCA pada tahap ini diperoleh dari laporan sebelumnya tentang produksi biodiesel dari WCO menggunakan limbah yang dihasilkan dari pertambangan bauksit. Limbah pertambangan bauksit tersebut dicuci dengan asumsi kebutuhan air pencucian sebesar 10 kg. Pada tahap ini, produk akhir yaitu katalis aktif dihasilkan dari limbah bauksit. Kebutuhan listrik total pada tahap ini diperkirakan sebesar 32,5017 kWh/ton biodiesel.

Tabel 1. Inventarisasi Data untuk Biodiesel WCO yang diproduksi Menggunakan Katalis dari Limbah Pertambangan

Proses Bisnis	Bahan dan Energi	Unit	Input	Output
Pengumpulan Bahan Baku	WCO	kg	941,14	941,14
	FFA	kg	47,06	47,06
	Limbah Bauksit	kg	94,11	94,11
	Diesel	kg	15,12	-
Transportasi Bahan Baku	WCO	kg	941,14	941,14
	FFA	kg	47,06	47,06
	Limbah Bauksit	kg	94,11	94,11
	Diesel	kg	36,16	-
	Transportasi	t*km	155,29	-
Pretreatment WCO	WCO	kg	941,14	941,14
	FFA	kg	47,06	-
	Asam Sulfat	kg	9,41	9,41
	Metanol	kg	200,00	190,22
	Air	kg	-	5,50
	Metil Ester	kg	-	51,33
	Listrik	kWh	27,67	-
Sintesis Katalis	Limbah Bauksit	kg	94,11	-
	Katalis Aktif	kg	-	89,41
	Residu/prosess loss	kg	-	4,71
	Listrik	kWh	32,50	-
	Air	kg	10,00	10,00
Transesterifikasi	WCO	kg	941,14	-
	Metil Ester	kg	51,33	1000,00
	Katalis	kg	89,41	89,41
	Metanol	kg	190,22	9,52
	Gliserol	kg	-	173,17
	Listrik	kWh	36,40	-
	Hot Water	kg	100,00	-
	Waste Water	kg	-	90,00

2.2.4. Produksi dan Pemurnian Biodiesel

Untuk reaksi transesterifikasi dan produksi biodiesel, jumlah tetap metanol dan katalis yang diusulkan dicampur dengan WCO yang telah dipraolah dengan beban katalis optimal. Pembersihan dan daur ulang katalis maupun metanol residu tidak termasuk dalam sistem yang diteliti. Biodiesel diekstraksi dan dicuci menggunakan air panas pada suhu 100 derajat Celcius, dengan perbandingan 100 kg air per ton biodiesel. Konsumsi listrik selama konversi biodiesel, yaitu 36,4 kWh/ton biodiesel, dianggap sebagai konsumsi listrik yang dibutuhkan selama transesterifikasi WCO. Tabel 1 menunjukkan LCI (*Life Cycle Inventory*) untuk pengumpulan dan transportasi bahan baku, *pretreatment* WCO, sintesis katalis, dan transesterifikasi WCO.

2.2.5. Produksi dan Pemurnian Biodiesel

Untuk reaksi transesterifikasi dan produksi biodiesel, jumlah tetap metanol dan katalis yang diusulkan dicampur dengan WCO yang telah dipanaskan sebelumnya dengan beban katalis optimal. Perlu dicatat bahwa pembersihan dan daur ulang katalis tidak termasuk dalam sistem yang diteliti. Biodiesel diekstraksi dan dicuci menggunakan air panas pada suhu 100 derajat Celcius, dengan perbandingan 1000 kg air per ton biodiesel. Konsumsi listrik selama konversi biodiesel, yaitu 36,4 kWh/ton biodiesel, dianggap sebagai konsumsi listrik yang dibutuhkan selama transesterifikasi WCO. Tabel 1 menunjukkan LCI (*Life Cycle Inventory*) untuk pengumpulan dan transportasi bahan baku,

pretreatment WCO, sintesis katalis, dan transesterifikasi WCO.

2.3. Penilaian Dampak

Langkah ketiga dalam LCA atau LCIA mengikuti definisi tujuan dan ruang lingkup serta LCI, dan digunakan untuk menafsirkan hasil. Penilaian dampak adalah tahap yang mengevaluasi dampak lingkungan berdasarkan hasil yang diperoleh dari analisis inventarisasi siklus hidup sebelumnya. Perhitungan penilaian dampak dilakukan dengan menggunakan metode kajian dampak *Eco-indicator 99 (E) V2.10* dengan bantuan *software SimaPro 10.2.0.3*. Kategori dampak yang dikaji dalam penelitian ini yaitu potensi karsinogen, potensi bahan organik pernapasan, potensi bahan anorganik pernapasan, potensi perubahan iklim, potensi radiasi, potensi lapisan ozon, potensi toksisitas ekologi, potensi asamifikasi/eutrofikasi, potensi penggunaan lahan, potensi mineral, dan potensi bahan bakar fosil.

Pemilihan metode *Eco-indicator 99 (E) V2.10/Europe EI 99 E/A* pada penelitian ini didasarkan pada dua pertimbangan: metode ini merupakan salah satu metode LCIA berorientasi *endpoint* yang paling banyak divalidasi dan digunakan pada studi LCA biodiesel WCO sejenis ((Alanis et al., 2022); (Phang et al., 2026)), sehingga hasil penelitian dapat dibandingkan secara konsisten dengan literatur; dan ketersediaannya pada basis data *SimaPro 10.2.0.3* yang digunakan. Namun demikian, faktor karakterisasi pada metode ini dikembangkan berdasarkan kondisi lingkungan Eropa sehingga tidak sepenuhnya merepresentasikan konteks geografis

Indonesia. Kategori radiasi, khususnya, menghasilkan nilai yang sangat tinggi secara artifisial karena faktor karakterisasinya dihitung berdasarkan bauran listrik Eropa (*European electricity mix*) yang mengandung proporsi energi nuklir tinggi, sedangkan bauran listrik Indonesia didominasi PLTU batu bara dan PLTA tanpa kontribusi energi nuklir. Oleh karena itu, tiga kategori dampak radiasi, lapisan ozon, dan penggunaan lahan dikeluarkan dari pembahasan utama penelitian ini karena tidak memiliki relevansi mekanistik yang kuat dan/atau menghasilkan nilai yang tidak representatif untuk konteks Indonesia; keterbatasan metodologis ini dinyatakan secara eksplisit sebagai batasan penelitian.

2.4. Interpretasi

Tahap akhir dari Analisis Siklus Hidup (LCA) adalah interpretasi, yang bertujuan untuk mengusulkan alternatif untuk setiap jenis dampak lingkungan pada setiap tahap siklus hidup. Tahap ini melibatkan analisis masukan untuk mengidentifikasi keluaran atau faktor potensial yang bertanggung jawab atas dampak lingkungan yang diamati, sehingga mendukung formulasi kebijakan terintegrasi untuk menentukan langkah tindakan yang paling tepat.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Hasil Analisis Dampak Siklus Hidup

Dalam proyek penelitian ini, lima fase inventarisasi produksi biodiesel WCO, yaitu pengumpulan bahan baku, transportasi bahan baku, pretreatment bahan baku, sintesis katalis, dan reaksi transesterifikasi biodiesel, digunakan untuk melakukan studi LCA. Inventori dilakukan berdasarkan masukan dan keluaran bahan dalam sistem sebagaimana disajikan pada Tabel 1. Dari data input maupun output setiap proses digunakan sebagai dasar perhitungan dampak menggunakan *software SimaPro 10.2.0.3* yang nantinya akan diketahui nilai dari masing-masing kategori dampak.

3.2. Penilaian Dampak Lingkungan Indikator Tengah (*Midpoint*)

Analisis dampak pada penelitian ini menggunakan metode *Eco-indicator 99 (E) V2.10/Europe EI 99 E/A*. Berikut penilaian dampak daur hidup proses pembuatan biodiesel berbahan baku minyak goreng bekas menggunakan katalis dari limbah pertambangan:

a. Potensi Karsinogen

Pada Tabel 2 menunjukkan nilai potensi karsinogen, per ton biodiesel, pada unit proses Pengumpulan Bahan Baku menghasilkan dampak sebesar $1,47\text{E-}05$ DALY/ton; Transportasi Bahan Baku sebesar $2,07\text{E-}05$ DALY/ton; Perlakuan Awal Minyak Goreng sebesar $8,30\text{E-}05$ DALY/ton; Sintesis Katalis sebesar $2,83\text{E-}05$ DALY/ton; dan Transesterifikasi sebesar $1,15\text{E-}04$ DALY/ton. Maka total dampak potensi karsinogen adalah sebesar $2,62\text{E-}04$ DALY/ton.

b. Potensi Bahan Organik Pernapasan

Pada Tabel 2 menunjukkan nilai potensi bahan organik pernapasan, per ton biodiesel, pada unit proses Pengumpulan Bahan Baku sebesar $3,47\text{E-}07$ DALY/ton; Transportasi Bahan Baku sebesar $1,36\text{E-}06$ DALY/ton; Perlakuan Awal Minyak Goreng sebesar $4,66\text{E-}06$ DALY/ton; Sintesis Katalis sebesar $1,34\text{E-}07$ DALY/ton; dan Transesterifikasi sebesar $5,03\text{E-}06$ DALY/ton. Maka total dampak potensi bahan organik pernapasan adalah sebesar $1,15\text{E-}05$ DALY/ton.

c. Potensi Bahan Anorganik Pernapasan

Pada Tabel 2 menunjukkan nilai potensi bahan anorganik pernapasan, per ton biodiesel, pada unit proses Pengumpulan Bahan Baku sebesar $8,99\text{E-}05$ DALY/ton; Transportasi Bahan Baku sebesar $4,39\text{E-}04$ DALY/ton; Perlakuan Awal Minyak Goreng sebesar $1,01\text{E-}03$ DALY/ton; Sintesis Katalis sebesar $6,65\text{E-}04$ DALY/ton; dan Transesterifikasi sebesar $1,88\text{E-}03$ DALY/ton. Maka total dampak potensi bahan anorganik pernapasan adalah sebesar $4,08\text{E-}03$ DALY/ton.

d. Potensi Perubahan Iklim

Pada Tabel 2 menunjukkan nilai potensi perubahan iklim, per ton biodiesel, pada unit proses Pengumpulan Bahan Baku sebesar $1,90\text{E-}05$ DALY/ton; Transportasi Bahan Baku sebesar $8,20\text{E-}05$ DALY/ton; Perlakuan Awal Minyak Goreng sebesar $1,17\text{E-}04$ DALY/ton; Sintesis Katalis sebesar $2,09\text{E-}05$ DALY/ton; dan Transesterifikasi sebesar $1,47\text{E-}04$ DALY/ton. Maka total dampak potensi perubahan iklim adalah sebesar $3,85\text{E-}04$ DALY/ton. Nilai ini sejalan dengan temuan (Musharavati et al., 2023) yang melaporkan potensi pemanasan global biodiesel dari limbah minyak nabati sebesar $1,36 \times 10^{-4}$ kg CO₂ eq/kg jauh lebih rendah dibandingkan biodiesel berbasis minyak sawit sebesar 9,87 kg CO₂ eq/kg yang menegaskan keunggulan relatif biodiesel berbahan baku limbah dibandingkan bahan baku generasi pertama.

e. Potensi Toksisitas Ekologi

Pada Tabel 2 menunjukkan nilai potensi toksisitas ekologi, per ton biodiesel, pada unit proses Pengumpulan Bahan Baku sebesar $11,61$ PAF*m²yr/ton; Transportasi Bahan Baku sebesar $22,53$ PAF*m²yr/ton; Perlakuan Awal Minyak Goreng sebesar $79,94$ PAF*m²yr/ton; Sintesis Katalis sebesar $13,78$ PAF*m²yr/ton; dan Transesterifikasi sebesar $87,77$ PAF*m²yr/ton. Maka total dampak potensi toksisitas ekologi adalah sebesar $215,62$ PAF*m²yr/ton.

f. Potensi Asamifikasi/ Eutrofikasi

Pada Tabel 2 menunjukkan nilai potensi asamifikasi/eutrofikasi, per ton biodiesel, pada unit proses Pengumpulan Bahan Baku sebesar $4,66$ PDF*m²yr/ton; Transportasi Bahan Baku sebesar $23,07$ PDF*m²yr/ton; Perlakuan Awal Minyak Goreng sebesar $23,52$ PDF*m²yr/ton; Sintesis Katalis sebesar $2,67$ PDF*m²yr/ton; dan Transesterifikasi sebesar $30,15$ PDF*m²yr/ton. Maka total dampak potensi

asamifikasi/eutrofikasi adalah sebesar 84,07 PDF*m²yr/ton.

g. Potensi Mineral

Pada Tabel 2 menunjukkan nilai potensi mineral, per ton biodiesel, pada unit proses Pengumpulan Bahan Baku sebesar 47,54 MJ surplus/ton; Transportasi Bahan Baku sebesar 47,75 MJ surplus/ton; Perlakuan Awal Minyak Goreng sebesar 46,43 MJ surplus/ton; Sintesis Katalis sebesar 4,21 MJ surplus/ton; dan Transesterifikasi sebesar 58,36 MJ surplus/ton. Maka total dampak potensi mineral adalah sebesar 204,28 MJ surplus/ton. Kontribusi sintesis katalis lumpur merah terhadap total dampak sistem pada penelitian ini (berkisar 1-16% pada berbagai kategori *midpoint*) berada pada rentang yang jauh lebih rendah dibandingkan kontribusi katalis Fe/CaO pada (Alanis et al., 2022) terhadap GWP

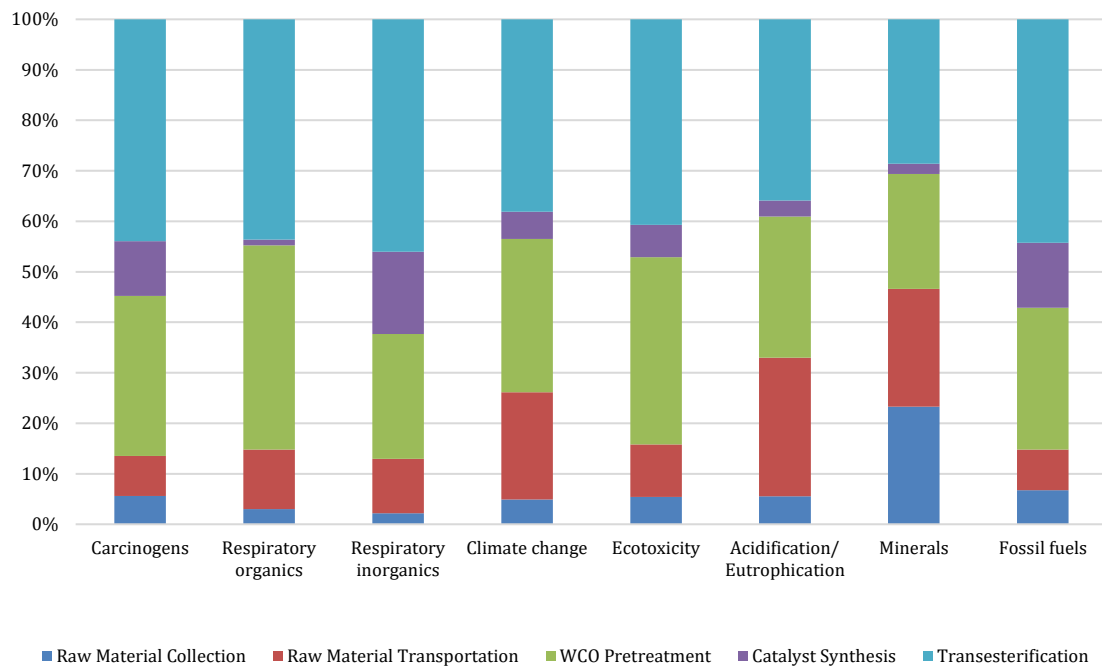
(34,69%), asamifikasi (34,71%), dan eutrofikasi (34,7%), yang mengindikasikan bahwa katalis berbasis limbah bauksit berpotensi memberikan beban lingkungan yang relatif lebih rendah dibandingkan katalis berbasis logam yang disintesis dari bahan baku primer.

h. Potensi Bahan Bakar Fosil

Pada Tabel 2 menunjukkan nilai potensi bahan bakar fosil, per ton biodiesel, pada unit proses Pengumpulan Bahan Baku sebesar 8,90 MJ surplus/ton; Transportasi Bahan Baku sebesar 10,55 MJ surplus/ton; Perlakuan Awal Minyak Goreng sebesar 36,90 MJ surplus/ton; Sintesis Katalis sebesar 16,90 MJ surplus/ton; dan Transesterifikasi sebesar 58,10 MJ surplus/ton. Maka total dampak potensi bahan bakar fosil adalah sebesar 131,35 MJ surplus/ton.

Tabel 2. Nilai Dampak *Midpoint Analysis*

Impact category	Unit	Total	Pengumpulan Bahan Baku	Transportasi Bahan Baku	Perlakuan Awal Minyak Goreng	Sintesis Katalis	Transesterifikasi
<i>Carcinogens</i>	DALY	2,62E-04	1,47E-05	2,07E-05	8,30E-05	2,83E-05	1,15E-04
<i>Respiratory organics</i>	DALY	1,15E-05	3,47E-07	1,36E-06	4,66E-06	1,34E-07	5,03E-06
<i>Respiratory inorganics</i>	DALY	4,08E-03	8,99E-05	4,39E-04	1,01E-03	6,65E-04	1,88E-03
<i>Climate change</i>	DALY	3,85E-04	1,90E-05	8,20E-05	1,17E-04	2,09E-05	1,47E-04
<i>Ecotoxicity</i>	PAF*m ² yr	215,62	11,61	22,53	79,94	13,78	87,77
<i>Acidification/Eutrophication</i>	PDF*m ² yr	84,07	4,66	23,07	23,52	2,67	30,15
<i>Minerals</i>	MJ surplus	204,28	47,54	47,75	46,43	4,21	58,36
<i>Fossil fuels</i>	MJ surplus	131,35	8,90	10,55	36,90	16,90	58,10



Gambar 3. Kontribusi Relatif Setiap Unit Proses pada Kategori Dampak *Midpoint* untuk Lima Fase Produksi Biodiesel

Gambar 3 menggambarkan diagram batang bertumpuk yang digunakan untuk mengevaluasi kontribusi setiap tahap inventarisasi pada nilai dampak analisis *midpoint*. Transesterifikasi digunakan sebagai tahap referensi untuk membangun diagram batang data relatif.

3.3. Penilaian Dampak Lingkungan Indikator Akhir (*Endpoint*)

Eco-indicator 99 (E) V2.10/Europe EI 99 E/A menghubungkan berbagai tahap inventarisasi produksi biodiesel dengan tiga kategori kerusakan utama: kesehatan manusia (*Human Health*), kualitas ekosistem (*Ecosystem Quality*), dan penggunaan sumber daya (*Resources*). Nilai *Human Health* pada analisis *endpoint* dihitung dari agregasi kategori dampak *midpoint* yang berdimensi DALY, yaitu karsinogen, bahan organik pernapasan, bahan anorganik pernapasan, dan perubahan iklim, tanpa menyertakan kategori radiasi yang tidak relevan untuk sistem kelistrikan Indonesia sebagaimana dijelaskan pada bagian 2.3. Tabel 3 menyajikan hasil analisis dampak *endpoint* yang telah dihitung.

Berdasarkan Tabel 3, potensi kerusakan kesehatan manusia (*Human Health*) per ton biodiesel pada unit proses Pengumpulan Bahan Baku menghasilkan dampak sebesar 1,24E-04 DALY/ton (2,6%); Transportasi Bahan Baku sebesar 5,44E-04 DALY/ton (11,5%); Perlakuan Awal Minyak Goreng sebesar 1,22E-03 DALY/ton (25,7%); Sintesis Katalis sebesar 7,14E-04 DALY/ton (15,0%); dan Transesterifikasi sebesar 2,15E-03 DALY/ton (45,3%), sebagai kontributor tertinggi. Maka total dampak potensi kerusakan kesehatan manusia adalah sebesar 4,75E-03 DALY/ton.

Pada kategori kerusakan kualitas ekosistem (*Ecosystem Quality*), unit proses Pengumpulan Bahan

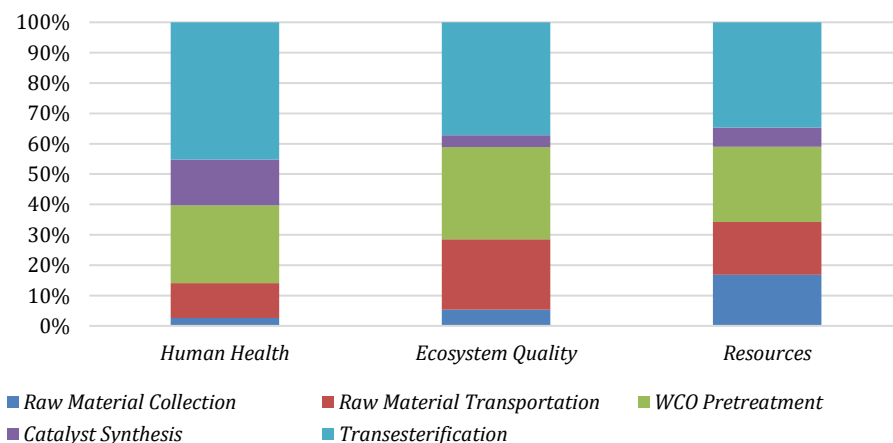
Baku menghasilkan dampak sebesar 5,73 PDF*m²yr/ton (5,3%); Transportasi Bahan Baku sebesar 24,90 PDF*m²yr/ton (23,2%); Perlakuan Awal Minyak Goreng sebesar 32,63 PDF*m²yr/ton (30,4%); Sintesis Katalis sebesar 4,16 PDF*m²yr/ton (3,9%); dan Transesterifikasi sebesar 39,99 PDF*m²yr/ton (37,2%), sebagai kontributor tertinggi. Maka total dampak potensi kerusakan kualitas ekosistem adalah sebesar 107,41 PDF*m²yr/ton.

Pada kategori kerusakan penggunaan sumber daya (*Resources*), unit proses Pengumpulan Bahan Baku menghasilkan dampak sebesar 56,44 MJ surplus/ton (16,8%); Transportasi Bahan Baku sebesar 58,30 MJ surplus/ton (17,4%); Perlakuan Awal Minyak Goreng sebesar 83,33 MJ surplus/ton (24,8%); Sintesis Katalis sebesar 21,10 MJ surplus/ton (6,3%); dan Transesterifikasi sebesar 116,46 MJ surplus/ton (34,7%), sebagai kontributor tertinggi. Maka total dampak potensi kerusakan penggunaan sumber daya adalah sebesar 335,63 MJ surplus/ton.

Gambar 4 menggambarkan diagram batang bertumpuk yang digunakan untuk mengevaluasi kontribusi setiap tahap inventarisasi pada nilai dampak analisis *endpoint*. Berbeda dengan analisis *midpoint* pada beberapa kategori dampak di mana kontribusi transportasi dan pengumpulan bahan baku relatif tinggi (misalnya pada kategori mineral dan asamifikasi/eutrofikasi), pada tingkat *endpoint* unit proses Transesterifikasi secara konsisten menjadi kontributor tertinggi pada ketiga kategori kerusakan, karena kategori *endpoint* mengagregasi seluruh kategori *midpoint* yang didominasi oleh proses ini (karsinogen, bahan anorganik pernapasan, perubahan iklim, toksisitas ekologi, mineral, dan bahan bakar fosil).

Tabel 3. Nilai Dampak *Endpoint Analysis*

Damage category	Unit	Total	Pengumpulan Bahan Baku	Transportasi Bahan Baku	Perlakuan Awal Minyak Goreng	Sintesis Katalis	Transesterifikasi
<i>Human Health</i>	DALY	4.75E-03	1.24E-04	5.44E-04	1.22E-03	7.14E-04	2.15E-03
<i>Ecosystem Quality</i>	PDF*m2yr	107,41	5,73	24,90	32,63	4,16	39,99
<i>Resources</i>	MJ surplus	335,63	56,44	58,30	83,33	21,10	116,46



Gambar 4. Kontribusi Relatif Setiap Unit Proses pada Kategori Dampak *Endpoint* untuk Lima Fase Produksi Biodiesel

3.4. Interpretasi

Interpretasi merupakan tahap akhir dari studi LCA. Setelah mengukur potensi dampak dari setiap proses, isu-isu kunci atau titik panas yang paling signifikan berkontribusi terhadap setiap kategori dampak dalam sistem diidentifikasi. Berdasarkan isu-isu kritis ini, rekomendasi untuk perbaikan dapat diajukan guna mengurangi dampak lingkungan. Hasil interpretasi disajikan sebagai berikut:

a. Potensi Karsinogen

Potensi karsinogen dalam sistem produksi biodiesel didominasi oleh tahap transesterifikasi, yang dipengaruhi oleh penggunaan metanol, konsumsi energi listrik, dan kebutuhan panas reaksi, sehingga meningkatkan potensi emisi senyawa berbahaya bagi kesehatan manusia. Disimpulkan bahwa *hotspot* potensi karsinogen terdapat pada unit proses transesterifikasi dengan nilai karakterisasi dampak sebesar $1,15\text{E-}04$ DALY/ton biodiesel, tertinggi dibandingkan unit proses lainnya.

b. Potensi Bahan Organik Pernapasan

Potensi bahan organik pernapasan terutama dipengaruhi oleh tahap transesterifikasi, yang berkaitan dengan emisi senyawa organik volatil (VOC) dari penggunaan metanol dan proses pemanasan. Disimpulkan bahwa *hotspot* kategori ini terjadi pada unit proses transesterifikasi dengan nilai karakterisasi dampak sebesar $5,03\text{E-}06$ DALY/ton biodiesel, sebagai kontribusi terbesar.

c. Potensi Bahan Anorganik Pernapasan

Potensi bahan anorganik pernapasan didominasi oleh tahap transesterifikasi akibat tingginya konsumsi energi listrik dan panas, yang memicu emisi NO_x , SO_x , dan partikulat. Disimpulkan bahwa *hotspot* potensi bahan anorganik pernapasan terdapat pada unit proses transesterifikasi dengan nilai karakterisasi dampak sebesar $1,88\text{E-}03$ DALY/ton biodiesel, tertinggi dalam kategori ini.

d. Potensi Perubahan Iklim

Potensi perubahan iklim terutama dipengaruhi oleh tahap transesterifikasi yang memiliki kebutuhan energi listrik dan panas tinggi, sehingga menghasilkan emisi gas rumah kaca terbesar. Disimpulkan bahwa *hotspot* potensi perubahan iklim terdapat pada unit proses transesterifikasi dengan nilai karakterisasi dampak sebesar $1,47\text{E-}04$ DALY/ton biodiesel.

e. Potensi Toksisitas Ekologi

Potensi toksisitas ekologi didominasi oleh tahap transesterifikasi, yang dipengaruhi oleh potensi pelepasan residu bahan kimia dan limbah cair. Disimpulkan bahwa *hotspot* potensi toksisitas ekologi terdapat pada unit proses transesterifikasi dengan nilai karakterisasi dampak sebesar $87,77$ PAF $\cdot\text{m}^2\text{yr/ton}$ biodiesel, sebagai nilai tertinggi.

f. Potensi Asamifikasi/ Eutrofikasi

Potensi asamifikasi dan eutrofikasi terutama dipengaruhi oleh tahap transesterifikasi, yang berkaitan dengan emisi NO_x dan SO_x dari konsumsi energi dan pembakaran bahan bakar fosil. Disimpulkan bahwa *hotspot* potensi asamifikasi dan eutrofikasi terjadi pada unit proses transesterifikasi dengan nilai karakterisasi dampak sebesar $30,15$ PDF $\cdot\text{m}^2\text{yr/ton}$ biodiesel, diikuti oleh transportasi bahan baku ($23,07$ PDF $\cdot\text{m}^2\text{yr/ton}$; $27,4\%$) yang memberikan kontribusi signifikan akibat konsumsi bahan bakar fosil dan jarak logistik yang panjang.

g. Potensi Penggunaan Lahan

Potensi penggunaan lahan didominasi oleh tahap perlakuan awal minyak goreng, yang berkaitan dengan kebutuhan fasilitas produksi dan konsumsi energi. Disimpulkan bahwa *hotspot* potensi penggunaan lahan terdapat pada unit proses perlakuan awal minyak goreng dengan nilai karakterisasi dampak sebesar $1,12$ PDF $\cdot\text{m}^2\text{yr/ton}$ biodiesel.

h. Potensi Mineral

Potensi kelangkaan mineral terutama dipengaruhi oleh tahap transesterifikasi, yang berkaitan dengan kebutuhan material pendukung dan konsumsi energi, meskipun distribusinya relatif merata antar unit proses. Disimpulkan bahwa *hotspot* potensi mineral terdapat pada unit proses transesterifikasi dengan nilai karakterisasi dampak sebesar $58,36$ MJ surplus/ton biodiesel.

i. Potensi Bahan Bakar Fosil

Potensi bahan bakar fosil didominasi oleh tahap transesterifikasi, yang dipicu oleh tingginya kebutuhan energi panas dan listrik. Disimpulkan bahwa *hotspot* potensi bahan bakar fosil terdapat pada unit proses transesterifikasi dengan nilai karakterisasi dampak sebesar $58,10$ MJ surplus/ton biodiesel.

j. Potensi Kerusakan Kesehatan Manusia

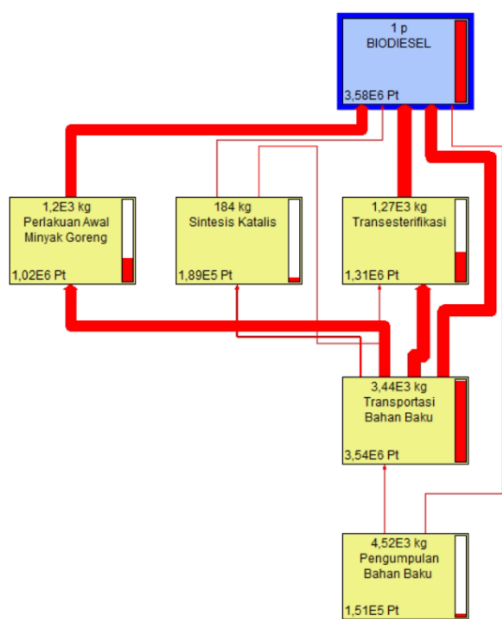
Berdasarkan hasil analisis *endpoint* pada Tabel 3, potensi kerusakan kesehatan manusia dalam sistem produksi biodiesel didominasi oleh unit proses Transesterifikasi, yang memberikan kontribusi dampak terbesar ($2,15\text{E-}03$ DALY/ton; $45,3\%$ dari total $4,75\text{E-}03$ DALY/ton) dibandingkan unit proses lainnya. Tingginya konsumsi metanol dan kebutuhan energi listrik-panas pada tahap ini memicu emisi polutan udara seperti nitrogen oksida (NO_x), sulfur oksida (SO_x), partikulat, dan senyawa toksik lainnya yang berkontribusi terhadap gangguan pernapasan, efek karsinogenik, dan risiko kesehatan jangka panjang. Disimpulkan bahwa *hotspot* potensi kerusakan kesehatan manusia terdapat pada unit proses transesterifikasi, diikuti oleh praperlakuan WCO ($1,22\text{E-}03$ DALY/ton; $25,7\%$) sebagai kontributor terbesar kedua.

k. Potensi Kerusakan Kualitas Lingkungan

Potensi kerusakan kualitas lingkungan (Ecosystem Quality) juga didominasi oleh unit proses

Transesterifikasi dengan kontribusi sebesar 39,99 PDF*m²yr/ton (37,2% dari total 107,41 PDF*m²yr/ton), yang berkaitan dengan emisi NO_x, SO_x, serta senyawa toksik dari penggunaan metanol dan konsumsi energi yang tinggi. Praperlakuan WCO menjadi kontributor terbesar kedua (32,63 PDF*m²yr/ton; 30,4%), diikuti oleh transportasi bahan baku (24,90 PDF*m²yr/ton; 23,2%) yang tetap memberikan kontribusi signifikan akibat konsumsi bahan bakar fosil dan intensitas aktivitas logistik jarak jauh (300 km).

1. Potensi Kerusakan Penggunaan Sumber Daya
Potensi kerusakan penggunaan sumber daya dalam sistem produksi biodiesel turut didominasi oleh unit proses Transesterifikasi dengan kontribusi sebesar 116,46 MJ surplus/ton (34,7% dari total 335,63 MJ surplus/ton), yang disebabkan oleh konsumsi energi listrik-panas dan penggunaan metanol dalam jumlah besar yang bersumber dari gas alam (bahan bakar fosil). Perlakuan awal minyak goreng menjadi kontributor terbesar kedua (83,33 MJ surplus/ton; 24,8%). Disimpulkan bahwa isu penting (*hotspot*) potensi kerusakan penggunaan sumber daya terdapat pada unit proses transesterifikasi, sebagai kontribusi tertinggi terhadap kategori sumber daya.



Gambar 5. Network Proses Pembuatan Biodiesel pada Software Simapro

Pada Gambar 5 ditunjukkan proses jaringan produksi biodiesel dalam perangkat lunak SimaPro, dengan total dampak lingkungan sistem produksi biodiesel secara keseluruhan sebesar 3,58E6 Pt per ton biodiesel. Nilai yang ditampilkan pada setiap kotak dalam network merupakan kontribusi kumulatif masing-masing unit proses beserta seluruh proses background-nya; kontribusi langsung (*foreground*) masing-masing unit proses adalah: transesterifikasi 1,31E6 Pt sebagai kontributor

foreground terbesar, praperlakuan WCO 1,02E6 Pt, sintesis katalis 1,89E5 Pt, dan pengumpulan bahan baku 1,51E5 Pt. Nilai transportasi bahan baku (3,54E6 Pt) yang tampak besar pada diagram network mencakup akumulasi dampak dari seluruh rantai proses background di baliknya (produksi bahan bakar diesel, manufaktur kendaraan, dan infrastruktur logistik), bukan kontribusi langsung dari aktivitas transportasi itu sendiri.

Berdasarkan hasil analisis dan interpretasi yang telah dikoreksi menggunakan metode *Eco-indicator 99 (E)*, dapat disimpulkan bahwa isu penting (*hotspot*) utama dalam sistem produksi biodiesel berbahan baku minyak goreng bekas terletak pada unit proses Transesterifikasi, baik pada tingkat *midpoint* maupun *endpoint*. Tahap ini secara dominan berkontribusi terhadap sebagian besar kategori dampak lingkungan, khususnya potensi karsinogen, gangguan pernapasan, perubahan iklim, toksisitas ekologi, asamifikasi-eutrofikasi, konsumsi sumber daya fosil dan mineral (tingkat *midpoint*), serta kesehatan manusia, kualitas ekosistem, dan penggunaan sumber daya (tingkat *endpoint*), yang terutama disebabkan oleh tingginya penggunaan metanol, konsumsi energi listrik dan panas, serta potensi pelepasan residu bahan kimia selama proses reaksi. Praperlakuan WCO merupakan hotspot sekunder yang konsisten pada kedua tingkat analisis, sedangkan transportasi dan pengumpulan bahan baku memberikan kontribusi signifikan namun tidak dominan, terutama pada kategori asamifikasi/eutrofikasi akibat jarak angkut yang panjang

4. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa beban lingkungan produksi biodiesel dari minyak goreng bekas dengan katalis lumpur merah terkonsentrasi pada tahap transesterifikasi, terutama akibat penggunaan metanol berbasis fosil dan kebutuhan energi listrik dan panas yang tinggi. Pola ini konsisten pada tingkat *midpoint* maupun *endpoint*, sehingga upaya perbaikan lingkungan paling efektif diarahkan pada efisiensi energi dan pengelolaan metanol. Sebaliknya, sintesis katalis dari limbah bauksit hanya menambah sebagian kecil beban sistem, sehingga valorisasi limbah pertambangan sebagai katalis dinilai layak dari sudut pandang lingkungan. Strategi mitigasi yang dapat dipertimbangkan meliputi peningkatan efisiensi energi, pemulihan dan daur ulang metanol, integrasi energi terbarukan, dan penguatan pengumpulan bahan baku secara terdesentralisasi.

DAFTAR PUSTAKA

- Adzahar, N. A., Asikin-Mijan, N., Saiman, M. I., Alsultan, G. A., Mastuli, M. S., Shamsuddin, M. R., & Taufiq-Yap, Y. H. (2022). Chemoselective decarboxylation of ceiba oil to diesel-range alkanes over a red mud based catalyst under H₂ -free conditions. *RSC Advances*, 12(26),

- 16903–16917.
<https://doi.org/10.1039/D2RA00853J>
- Alanis, C., Ávila Córdoba, L. I., Álvarez-Arteaga, G., Romero, R., Padilla-Rivera, A., & Natividad, R. (2022). Strategies to improve the sustainability of the heterogeneous catalysed biodiesel production from waste cooking oil. *Journal of Cleaner Production*, 380, 134970.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134970>
- Alternative Fuels Data Center. (2014). *Biodiesel Benefits and Considerations*.
<https://afdc.energy.gov/fuels/biodiesel-benefits>
- Barbosa, S. L., Nelson, D. L., Pacionio, L., Pedro, M., dos Santos, W. T. P., Wentz, A. P., Pessoa, F. L. P., Agblevor, F. A., Bortoleto, D. A., de Freitas-Marques, M. B., & Zanatta, L. D. (2023). Environmentally Friendly New Catalyst Using Waste Alkaline Solution from Aluminum Production for the Synthesis of Biodiesel in Aqueous Medium. *Bioengineering*, 10(6), 692.
<https://doi.org/10.3390/bioengineering10060692>
- Baskar, G., Aberna Ebenezer Selvakumari, I., & Aiswarya, R. (2018). Biodiesel production from castor oil using heterogeneous Ni doped ZnO nanocatalyst. *Bioresource Technology*, 250, 793–798.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.12.010>
- Chung, Z. L., Tan, Y. H., Chan, Y. S., Kansedo, J., Mubarak, N. M., Ghasemi, M., & Abdullah, M. O. (2019). Life cycle assessment of waste cooking oil for biodiesel production using waste chicken eggshell derived CaO as catalyst via transesterification. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 21, 101317.
<https://doi.org/10.1016/j.bcab.2019.101317>
- Dawam, A. A. (2017). *Aluminosilikat Mesopori dari Red Mud sebagai Katalis Esterifikasi Asam Lemak Bebas dalam Minyak Kemiri Sunan* [Institut Teknologi Sepuluh Nopember]. <https://repository.its.ac.id/49213/>
- Endalew, A. K., Kiros, Y., & Zanzi, R. (2011). Inorganic heterogeneous catalysts for biodiesel production from vegetable oils. *Biomass and Bioenergy*, 35(9), 3787–3809.
<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.06.011>
- Gad, M. S., Abu-Elyazeed, O. S., Mohamed, M. A., & Hashim, A. M. (2021). Effect of oil blends derived from catalytic pyrolysis of waste cooking oil on diesel engine performance, emissions and combustion characteristics. *Energy*, 223, 120019.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120019>
- Ghosh, N., Patra, M., & Halder, G. (2024). Current advances and future outlook of heterogeneous catalytic transesterification towards biodiesel production from waste cooking oil. *Sustainable Energy & Fuels*, 8(6), 1105–1152.
<https://doi.org/10.1039/D3SE01564E>
- Guo, Y., Meng, X., Wang, D., Meng, T., Liu, S., & He, R. (2016). Comprehensive risk evaluation of long-distance oil and gas transportation pipelines using a fuzzy Petri net model. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 33, 18–29.
<https://doi.org/10.1016/j.jngse.2016.04.052>
- Hamza, M., Ayoub, M., Shamsuddin, R. Bin, Mukhtar, A., Saqib, S., Zahid, I., Ameen, M., Ullah, S., Al-Sehemi, A. G., & Ibrahim, M. (2021). A review on the waste biomass derived catalysts for biodiesel production. *Environmental Technology & Innovation*, 21, 101200.
<https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101200>
- Hidayat, A., Roziq, G. K., Muhammad, F., Kurniawan, W., & Hinode, H. (2020). Biodiesel Synthesis from Used Cooking Oil Using Red Mud as Heterogeneous Catalyst. *Materials Science Forum*, 991, 144–149.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.991.144>
- Hosseinizadeh-Bandbafha, H., Li, C., Chen, X., Peng, W., Aghbashlo, M., Lam, S. S., & Tabatabaei, M. (2022). Managing the hazardous waste cooking oil by conversion into bioenergy through the application of waste-derived green catalysts: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 424, 127636.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127636>
- Musharavati, F., Sajid, K., Anwer, I., Nizami, A.-S., Javed, M. H., Ahmad, A., & Naqvi, M. (2023). Advancing Biodiesel Production System from Mixed Vegetable Oil Waste: A Life Cycle Assessment of Environmental and Economic Outcomes. *Sustainability*, 15(24), 16550.
<https://doi.org/10.3390/su152416550>
- Nunes, L. J. R. (2023). The Rising Threat of Atmospheric CO₂: A Review on the Causes, Impacts, and Mitigation Strategies. In *Environments - MDPI* (Vol. 10, Number 4). MDPI.
<https://doi.org/10.3390/environments10040066>
- Phang, F. J. F., Jong, J. L. H., Wong, M. T. Y., Chew, J. J., Ernawati, L., Puspitasari, D. A., Li, F., Chan, Y. S., Wong, B. T., & Sunarso, J. (2026). Life cycle assessment of biodiesel synthesis from waste cooking oil using bifunctional heterogeneous catalyst. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 20(4), 1882–1894.
<https://doi.org/10.1002/bbb.70165>
- Quah, R. V., Tan, Y. H., Mubarak, N. M., Khalid, M., Abdullah, E. C., & Nolasco-Hipolito, C. (2019). An overview of biodiesel production using recyclable biomass and non-biomass derived magnetic catalysts. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(4), 103219.
<https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103219>
- Sander, A., Antonije Koščak, M., Kosir, D., Milosavljević, N., Parlov Vuković, J., & Magić, L. (2018). The influence of animal fat type and purification conditions on biodiesel quality. *Renewable Energy*, 118, 752–760.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.11.068>
- Sharma, S., Saxena, V., Baranwal, A., Chandra, P., & Pandey, L. M. (2018). Engineered nanoporous materials mediated heterogeneous catalysts and their implications in biodiesel production. *Materials Science for Energy Technologies*, 1(1), 11–21.
<https://doi.org/10.1016/j.mset.2018.05.002>
- Uzun, B. B., Kılıç, M., Özbay, N., Pütün, A. E., & Pütün, E. (2012). Biodiesel production from waste frying oils: Optimization of reaction parameters and determination of fuel properties. *Energy*, 44(1), 347–351.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.06.024>
- Yu, S., Yuan, W., Xie, Q., Liang, X., & Nie, Y. (2025). Catalytic Combustion of Biodiesel Wastewater on Red Mud Catalyst. *Materials*, 18(3), 652.
<https://doi.org/10.3390/ma18030652>
- Zhuang, Y., Wang, X., Shah, K. J., & Sun, Y. (2025). A Review on the Preparation of Catalysts Using Red Mud Resources. *Catalysts*, 15(9), 809.
<https://doi.org/10.3390/catal15090809>