

Kajian Dampak Lingkungan Proses Manufaktur *Pipeline End Manifold* (PLEM) Berbasis Metode *Life Cycle Assessment* (LCA)

Syadzadhiya Qothrunada Zakiyayasin Nisa¹⁾*, Ariesta Sulistyo Asih¹⁾, Wahyu Ugroseno¹⁾, Cindy Aisyah Hakim¹⁾

¹⁾Program Studi Teknik Lingkungan, UPN Veteran Jawa Timur, Jl Rungkut Madya, Surabaya

*Email: syadzadhiya.tl@upnjatim.ac.id

Abstrak

Permintaan energi global hingga saat ini masih sangat bergantung pada minyak bumi sebagai sumber utama. Meskipun tren dunia menunjukkan pergeseran menuju energi terbarukan, konsumsi minyak tetap tinggi, khususnya untuk sektor transportasi, industri petrokimia, dan pembangkit listrik di negara berkembang. Produksi minyak lepas pantai merupakan solusi teknis yang banyak digunakan untuk memanfaatkan cadangan minyak dan gas di laut dalam yang tidak dapat dijangkau oleh metode konvensional. Salah satu komponen penting dalam sistem bawah laut tersebut adalah *Pipeline End Manifold* (PLEM), yang berfungsi sebagai penghubung utama antara pipa bawah laut dan sistem penerima di permukaan atau unit pengolahan berikutnya. Penelitian ini bertujuan menganalisis potensi dampak lingkungan dari proses produksi PLEM menggunakan metode *Life Cycle Assessment* (LCA) serta memberikan rekomendasi perbaikan yang dapat mengurangi dampak tersebut. Analisis dilakukan menggunakan perangkat lunak *OpenLCA* 11.1.0 dengan basis data *Greendelta* serta metode CML-IA *Baseline*. Data masukan yang digunakan mencakup kebutuhan bahan baku dan bahan bakar, sedangkan data keluaran berupa produk, limbah, dan emisi yang dihasilkan selama proses produksi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa proses produksi PLEM menghasilkan dampak lingkungan sebesar 0,0360126 kg PO₄ eq untuk kategori eutrofikasi, 0,00080028 kg C₂H₄ eq untuk oksidasi fotokimia, dan 2.573,30034 kg CO₂ eq untuk pemanasan global (GWP100a). Rekomendasi perbaikan yang dapat dilakukan adalah mengurangi limbah padat dengan mendaur ulang sisa baja melalui proses *Electric Arc Furnace* (EAF) guna meningkatkan efisiensi material dan menurunkan dampak lingkungan.

Kata kunci: Analisis dampak, *Life Cycle Assessment* (LCA), *Pipeline End Manifold* (PLEM), sistem bawah laut

Abstract

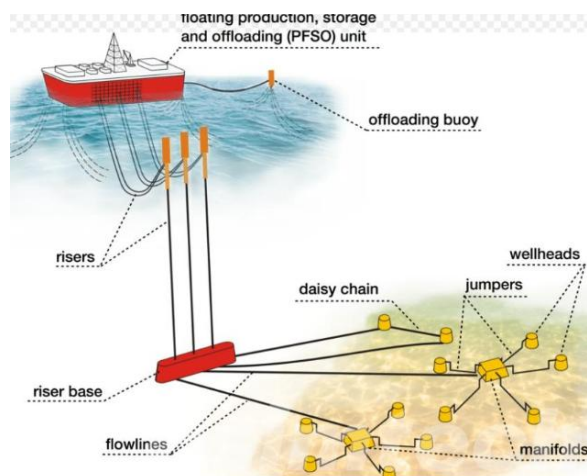
Global energy demand still relies heavily on petroleum as its main source. Although global trends point to a transition to renewable energy, oil consumption remains high, especially for transportation, the petrochemical industry, and power generation in developing countries. Offshore oil production is a commonly used technical solution for exploiting oil and gas reserves in deep-sea areas that cannot be reached by conventional methods. One important component in this subsea system is the *Pipeline End Manifold* (PLEM), which is the main connection between the subsea pipeline and the surface receiving system or further processing unit. This study discusses the environmental impact analysis of the *Pipeline End Manifold* (PLEM) production process using the *Life Cycle Assessment* (LCA) method with the aim of analyzing the potential environmental impact of the *Pipeline End Manifold* (PLEM) production process and providing recommendations for improvements that can reduce this potential impact. This environmental impact analysis uses *OpenLCA* 11.1.0 software with the *Greendelta* database and uses the CML-IA *Baseline* method. The input data used are raw material and fuel requirements, while the output data used are products, waste, and emissions generated in the PLEM production process. The results of the study show that the environmental impact generated from the *Pipeline End Manifold* (PLEM) production process consists of 0.0360126 kg PO₄ eq in eutrophication impact, 0.00080028 kg C₂H₄ eq in photochemical oxidation, and 2,573.30034 kg CO₂ eq in global warming (GWP100a). The improvement recommendation that can be made by the company is to reduce the waste generated during the production process by recycling the waste back into steel products using the *Electric Arc Furnace* (EAF) process.

Keywords: Impact analysis, *Life Cycle Assessment* (LCA), *Pipeline End Manifold* (PLEM), subsea system

1. PENDAHULUAN

Permintaan energi dunia hingga kini masih bergantung pada minyak bumi sebagai sumber utama. Meskipun berbagai negara telah berupaya melakukan transisi menuju energi terbarukan, penggunaan minyak tetap dominan terutama dalam sektor transportasi, industri petrokimia, dan pembangkitan listrik di negara berkembang (Sotoodeh, 2019). Menurut laporan *International Energy Agency* (IEA, 2023), konsumsi minyak global tahun 2023 mencapai lebih dari 100 juta barel per hari, sebagian besar dipasok dari kegiatan eksplorasi konvensional maupun non-konvensional termasuk di wilayah laut dalam. Eksplorasi tersebut menuntut ketersediaan infrastruktur bawah laut yang kompleks dan berteknologi tinggi.

Produksi minyak bawah laut (*subsea oil production*) merupakan pendekatan teknis yang umum digunakan untuk mengekstraksi minyak dan gas dari reservoir laut dalam. Dalam sistem produksi minyak dan gas lepas pantai, beberapa peralatan bekerja bersama di dasar laut (Gambar 1). Kepala sumur bawah laut menjadi pondasi dan titik kontrol utama, lalu di atasnya ada pohon natal bawah laut yang berfungsi seperti keran besar untuk membuka, menutup, atau mengatur aliran minyak dan gas. Semua peralatan ini terhubung ke fasilitas di permukaan melalui *umbilical*, yaitu kabel dan pipa kecil yang membawa listrik, sinyal, dan fluida kontrol. Aliran minyak atau gas dari beberapa sumur kemudian dikumpulkan melalui sistem *manifold*, semacam persimpangan pipa, sebelum dikirim ke fasilitas pengolahan di permukaan. Seluruh komponen ini bekerja terintegrasi agar produksi dari dasar laut dapat berjalan aman dan efisien (Sotoodeh, 2019). Salah satu komponen vital dalam sistem tersebut adalah *Pipeline End Manifold* (PLEM), yang berperan sebagai titik akhir jaringan pipa bawah laut sekaligus penghubung utama antara sistem dasar laut dan sistem penerima di permukaan atau unit pengolahan hilir (Ma *et al.*, 2018).



Gambar 1. Skema Sistem Produksi Minyak dan Gas Bawah Laut

PLEM berfungsi mengatur arah dan aliran minyak/gas dari dasar laut menuju fasilitas permukaan. Umumnya, PLEM dipasang di dasar laut menggunakan pondasi berat seperti *mud mat* atau *pile*, serta dilengkapi dengan katup pengendali, *header*, dan rangka baja tahan korosi. Berbeda dengan *Pipeline End Termination* (PLET), PLEM memiliki konfigurasi lebih kompleks karena mampu menangani lebih dari satu jalur pipa (Hong *et al.*, 2020). Dalam proyek bawah laut berskala besar, PLEM memainkan peran strategis untuk memastikan efisiensi dan keselamatan aliran fluida dari reservoir ke fasilitas pengolahan.

Proses produksi PLEM mencakup tahapan pemilihan bahan baku seperti baja karbon berlapis *Corrosion Resistant Alloy* (CRA), fabrikasi struktur utama, pengelasan header dan pipa, pemasangan katup dan sistem kontrol, hingga integrasi dengan *Subsea Control Module* (SCM). Setiap tahapan membutuhkan energi tinggi, terutama pada proses fabrikasi dan transportasi (Pacheco *et al.*, 2020). Peningkatan kebutuhan PLEM seiring meningkatnya eksplorasi lepas pantai menyebabkan kenaikan jumlah limbah dan emisi dari proses produksi. Dalam konteks keberlanjutan industri minyak dan gas, diperlukan evaluasi komprehensif terhadap dampak lingkungan dari proses produksi komponen bawah laut seperti PLEM. Pendekatan *Life Cycle Assessment* (LCA) merupakan metode holistik yang digunakan untuk mengukur dampak lingkungan suatu produk atau proses sepanjang siklus hidupnya — mulai dari ekstraksi bahan baku, produksi, transportasi, penggunaan, hingga pembuangan akhir.

Menurut standar ISO 14040 dan ISO 14044, LCA terdiri dari empat tahapan utama: (1) penetapan tujuan dan ruang lingkup, (2) inventarisasi daur hidup (*Life Cycle Inventory*), (3) penilaian dampak (*Life Cycle Impact Assessment*), dan (4) interpretasi hasil (Suer *et al.*, 2022). Beberapa studi sebelumnya menunjukkan bahwa pemilihan material dan desain proses manufaktur berpengaruh besar terhadap total dampak lingkungan (Zubail *et al.*, 2021; Alsadi & Matthews, 2022). Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan menilai dampak lingkungan dari proses produksi PLEM dan memberikan dasar ilmiah untuk pengembangan desain sistem bawah laut yang lebih berkelanjutan, sehingga hasil yang diperoleh dapat menjadi acuan dalam mengurangi jejak lingkungan, meningkatkan efisiensi material, serta mendorong penerapan teknologi produksi yang lebih ramah lingkungan pada tahap perancangan maupun operasional.

2. METODE

2.1 Pengumpulan data

Data dikumpulkan dari sebuah perusahaan fabrikasi PLEM di Surabaya, Provinsi Jawa Timur, Indonesia. Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif berdasarkan LCA untuk menilai dampak lingkungan dari proses produksi PLEM. Metodologi ini mengacu pada kerangka yang ditetapkan oleh ISO 14040 dan ISO 14044, yang mencakup empat tahap utama: (1) penentuan tujuan dan ruang lingkup, (2) inventarisasi daur hidup (LCI), (3) analisis dampak daur hidup (LCIA), dan (4) interpretasi (Muhyinsyah *et al.*, 2021).

Data primer diperoleh melalui wawancara terstruktur dan komunikasi langsung dengan karyawan yang bekerja di departemen produksi. Data tersebut mencakup spesifikasi teknis, jenis dan kuantitas material yang digunakan, konsumsi energi selama proses fabrikasi, serta metode transportasi dan instalasi. Penelitian ini tidak menggunakan data konsumsi listrik karena listrik bersumber dari data Perusahaan Listrik Negara (PLN), dan data dampak dari produksi listrik telah disediakan oleh Perusahaan Listrik Negara. Data sekunder berupa literatur teknis, jurnal ilmiah, laporan lingkungan proyek minyak dan gas, serta basis data LCA. Informasi ini digunakan untuk melengkapi data yang tidak tersedia langsung dari pabrikan, seperti emisi per unit bahan baku atau jejak karbon dari transportasi.

Satuan fungsional dalam penelitian ini didefinisikan sebagai "satu unit PLEM lengkap yang siap untuk dipasang di dasar laut dengan masa rancang 20 tahun," dengan batasan sistem *gate-to-gate*, yaitu dari persiapan material hingga menjadi produk akhir sebelum dikirim untuk instalasi. Batasan geografis penelitian mencakup kegiatan produksi yang berlangsung di fasilitas fabrikasi di Asia Tenggara dan transportasi regional.

2.2 Pengolahan data

Pemrosesan data dalam penelitian ini menggunakan metode LCA. Ruang lingkup tahapan LCA adalah *gate-to-gate*, yang hanya mencakup tahap produksi dan akan digunakan untuk menentukan dampak lingkungan. Data yang terkumpul dianalisis menggunakan perangkat lunak *OpenLCA*, yang memungkinkan penghitungan dampak lingkungan berdasarkan data inventori yang telah disusun.

Tahap pertama dari LCA adalah pendefinisian tujuan dan ruang lingkup studi. Tahap ini bertujuan untuk membangun pemahaman yang jelas tentang tujuan, aplikasi yang dimaksudkan, serta alasan dilakukannya penilaian. Tahap ini juga merinci unit fungsional,

batasan sistem, dan asumsi-asumsi kunci yang menjadi pedoman analisis. Definisi tujuan dan ruang lingkup ini didasarkan pada data dan informasi yang dikumpulkan selama fase studi pendahuluan. Tujuan dan ruang lingkup yang terdefinisi dengan baik memastikan tahapan LCA selanjutnya tetap konsisten, transparan, dan selaras dengan tujuan penelitian secara keseluruhan.

Tahap selanjutnya adalah analisis inventori atau *Life Cycle Inventory* (LCI). Pada tahap ini, setiap masukan (input) dan keluaran (output) dari sistem produksi PLEM diidentifikasi dan dikuantifikasi. Pengumpulan data dilakukan untuk menentukan jumlah material yang digunakan, limbah yang dihasilkan, serta emisi yang dibuang ke lingkungan selama daur hidup PLEM.

Tahap ketiga adalah analisis dampak atau *Life Cycle Impact Assessment* (LCIA). Pada tahap ini, proses penilaian dampak dari aktivitas produksi PLEM terhadap lingkungan dilakukan berdasarkan hasil analisis inventori yang telah dikumpulkan sebelumnya. Pemrosesan data menggunakan perangkat lunak OpenLCA dengan basis data Greendelta. Kategori dampak yang dianalisis terdiri dari *Global Warming Potential* (GWP), *Cumulative Energy Demand* (CED), *Acidification and Eutrophication Potential*, serta *Human Toxicity and Ecotoxicity Potential*.

Tahap akhir dalam LCA adalah interpretasi, yang bertujuan untuk menganalisis hasil dari tahapan-tahapan sebelumnya dalam kaitannya dengan tujuan penelitian ini. Hasil LCIA dianalisis secara kritis untuk mengidentifikasi tahapan produksi mana yang paling berkontribusi terhadap dampak lingkungan. Interpretasi ini juga digunakan untuk menyusun rekomendasi pengurangan dampak, seperti substitusi material, efisiensi energi, atau optimasi logistik.

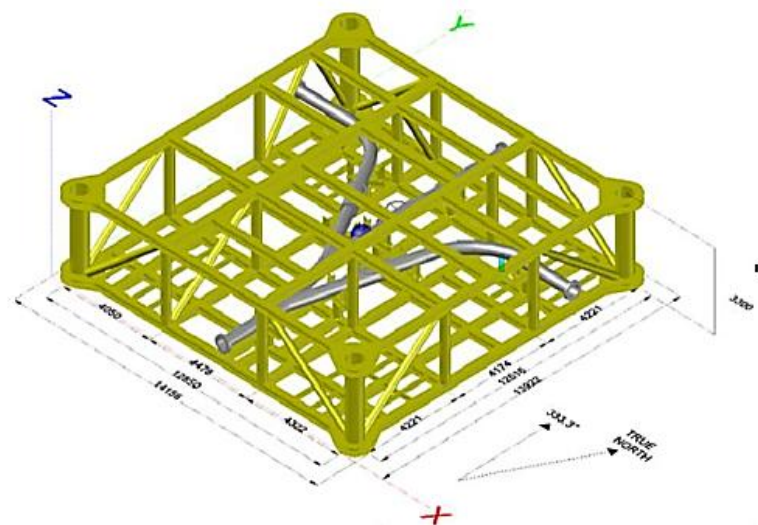
2.3 Definisi tujuan dan ruang lingkup

Penentuan tujuan dan ruang lingkup merupakan tahap awal dalam pelaksanaan analisis LCA. Pada tahap ini, ditetapkan tujuan penelitian serta batasan atau ruang lingkup penerapan LCA. Definisi tujuan dan ruang lingkup berfungsi sebagai dasar penyusunan rencana kerja untuk seluruh proses LCA.

Tujuan

Tahap ini menjelaskan maksud dan sasaran penelitian, serta mengidentifikasi penggunaan hasil kajian dan pihak yang akan memanfaatkannya. Tujuan dari penelitian ini

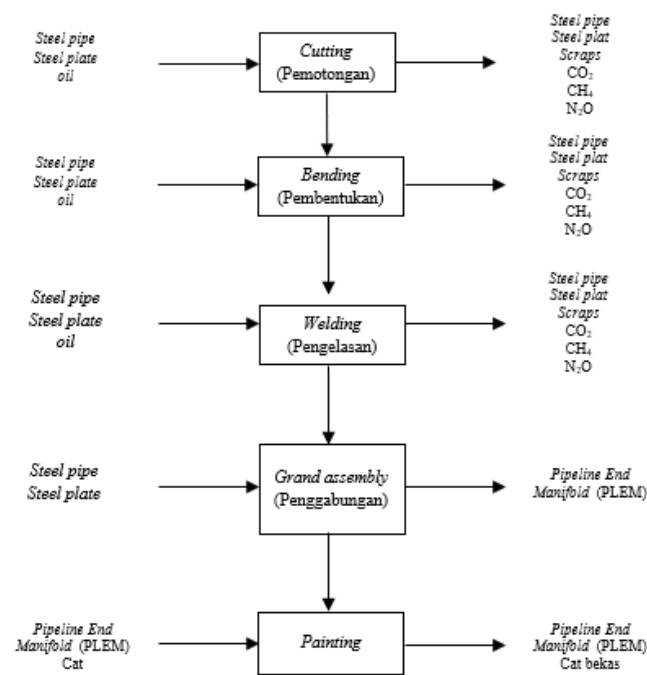
adalah untuk menghitung dan menganalisis dampak lingkungan dari proses produksi *Pipeline End Manifold* (PLEM).



Gambar 2. Pipeline End Manifold (PLEM)

Batasan Sistem

Batasan sistem yang dikaji mencakup proses produksi PLEM dengan pendekatan *gate-to-gate*. Pendekatan ini memperhitungkan input dan output dalam batas sistem produksi tanpa memasukkan proses ekstraksi bahan baku maupun pengelolaan limbah. Gambaran batasan sistem produksi PLEM dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Batasan Sistem Produksi PLEM

Tahapan yang dianalisis meliputi proses pemotongan, pembengkokan, penyambungan/pengelasan, perakitan utama (*grand assembly*), serta pengecatan/finishing (Faturahman & Ikhwani, 2024; Rui *et al.*, 2024). Inventarisasi dilakukan dengan mengkuantifikasi seluruh input dan output material yang terjadi dalam batasan sistem. Data input mencakup jumlah bahan baku, bahan bakar, dan bahan tambahan yang dibutuhkan selama proses manufaktur PLEM. Data keluaran terdiri atas produk PLEM yang telah selesai diproduksi serta emisi yang dilepaskan ke lingkungan pada setiap tahap produksi. Dua bahan baku utama yang digunakan dalam proses fabrikasi adalah pipa baja dan pelat baja, yang merupakan komponen struktural utama dari unit PLEM. Bahan-bahan ini menjalani serangkaian operasi seperti pemotongan, pengelasan, dan pelapisan sebelum perakitan akhir diselesaikan. Seluruh data masukan dan keluaran yang diperoleh dari tahap ini menjadi dasar untuk mengevaluasi konsumsi sumber daya dan dampak lingkungan pada analisis daur hidup selanjutnya. Data masukan untuk produksi PLEM dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Input Produksi

Jenis	Input	Satuan	Jumlah
Bahan Bakar	Diesel	Liter	950
Bahan Baku	Pipa baja	Kilogram	16.201
	Pelat baja	Kilogram	10.932
Tambahan	Cat	Liter	2.498,5

Tabel 1 menunjukkan material yang digunakan dalam proses produksi PLEM. Selain material tersebut, terdapat pula konsumsi bahan bakar berupa solar yang digunakan untuk mengoperasikan peralatan berat selama proses produksi. Seluruh material ini kemudian diolah dan diproses menjadi produk PLEM. Data keluaran produksi dapat dilihat pada Tabel 2. Proses produksi PLEM menghasilkan output total sebesar 23.347 kilogram (23,347 ton) PLEM, disertai dengan pembentukan berbagai jenis limbah, meliputi limbah padat dan emisi gas. Limbah padat terutama berupa scrap baja yang berasal dari pipa dan pelat baja, yang muncul selama proses pemotongan, pembengkokan, serta pengelasan/pemasangan.

Tabel 2. Output Produksi

Jenis	Output	Satuan	Jumlah
Produk	<i>Pipeline End Manifold</i> (PLEM)	Kilogram	23.346
Limbah Padat	Potongan logam	Kilogram	10.932
Emisi	CO ₂	Kilogram CO ₂	2.5t34,22
	N ₂ O	Kilogram N ₂ O	0,13338
	CH ₄	Kilogram CH ₄	0,13338

Emisi dihasilkan dari penggunaan alat berat yang menggunakan bahan bakar solar. Selama proses produksi, alat berat tersebut mengonsumsi 950 liter bahan bakar solar, sehingga menghasilkan emisi ke lingkungan. Parameter emisi yang diukur dalam penelitian ini meliputi CO₂, CH₄, dan N₂O. Perhitungan emisi pada penelitian ini mengacu pada pedoman IPCC (2019) dengan pendekatan *Tier 1*. Metode ini dipilih karena perhitungan didasarkan pada faktor emisi *default* global dan data konsumsi bahan bakar agregat, sementara data spesifik terkait karakteristik pembakaran mesin belum tersedia.

Perhitungan emisi:

Konsumsi bahan bakar solar sebesar 950 liter

Faktor emisi CO₂ = 74.100 kg/TJ

Faktor emisi CH₄ = 3,9 kg/TJ

Faktor emisi N₂O = 3,9 kg/TJ

Faktor nilai kalor bersih = 0,000036 TJ/liter

Emisi Gas CO₂

Konsumsi bahan bakar (liter) × Faktor nilai kalor bersih (TJ/liter) = Energi (TJ)

Emisi CO₂ (kgCO₂) = Energi (TJ) × Faktor emisi CO₂ kg/TJ

950 liter × 0,000036 TJ/liter = 0,0342 TJ

Emisi CO₂ = 0,0342 TJ × 74.100 kg/TJ = 2.534,22 kg CO₂

Emisi Gas CH₄

Konsumsi bahan bakar (liter) × Faktor nilai kalor bersih (TJ/liter) = Energi (TJ)

Emisi CH₄ (kgCH₄) = Energi (TJ) × Faktor emisi CH₄ kg/TJ

950 liter × 0,000036 TJ/liter = 0,0342 TJ

Emisi CH₄ = 0,0342 TJ × 3,9 kg/TJ = 0,13338 kg CH₄

Emisi Gas N₂O

Konsumsi bahan bakar (liter) × Faktor nilai kalor bersih (TJ/liter) = Energi (TJ)

Emisi N₂O (kgN₂O) = Energi (TJ) × Faktor emisi N₂O kg/TJ

950 liter × 0,000036 TJ/liter = 0,0342 TJ

Emisi N₂O = 0,0342 TJ × 3,9 kg/TJ = 0,13338 kg N₂O

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Hasil analisa

3.1.1 Analisa dampak produksi plem

Dampak yang diperhitungkan dalam proses produksi ini dalam perhitungan indeks tunggal meliputi pemanasan global, eutrofikasi, dan oksidasi fotokimia. Analisis dampak produksi PLEM yang dilakukan menggunakan *OpenLCA* menunjukkan bahwa kategori pemanasan global, eutrofikasi, dan oksidasi fotokimia merupakan kontributor utama terhadap total dampak lingkungan. Temuan ini sejalan dengan studi terbaru oleh Liu *et al.* (2020) yang menunjukkan bahwa proses produksi berbasis baja, termasuk pemotongan, pembentukan, dan pengelasan, menghasilkan emisi signifikan yang berdampak pada pemanasan global serta berkontribusi terhadap pembentukan senyawa reaktif yang memicu fotooksidasi. Studi tersebut juga menegaskan bahwa penggunaan energi fosil dan pengolahan logam berperan besar dalam meningkatkan potensi eutrofikasi melalui pelepasan senyawa nitrogen dan fosfat selama proses produksi. Dengan demikian, hasil analisis PLEM dalam penelitian ini konsisten dengan pola dampak lingkungan yang telah dilaporkan dalam literatur, dan menegaskan perlunya penerapan strategi efisiensi energi serta pengurangan limbah untuk menekan dampak yang ditimbulkan.

Tabel 3. Analisa Dampak oleh Produksi PLEM

Dampak	Nilai Dampak	Satuan
Eutrofikasi	0,0360126	kg PO ₄ eq
Oksidasi Fotokimia	0,00080028	kg C ₂ H ₄ eq
Pemanasan Global	2.573,30	kg CO ₂ eq

Interpretasi hasil analisis LCA yang merupakan tahap penafsiran seluruh tahapan yang telah dilakukan sebelumnya menghasilkan analisis dampak lingkungan pada penelitian ini. Analisis daur hidup yang dilakukan pada industri galangan kapal bertujuan untuk menilai dampak lingkungan dari proses produksi mulai dari bahan baku berupa pipa baja dan pelat baja hingga menjadi satu produk, yaitu *Pipeline End Manifold* (PLEM). Terdapat beberapa dampak lingkungan yang dapat dianalisis dengan menggunakan basis data *green-delta* dan metode CML-IA *Baseline*, yaitu eutrofikasi, oksidasi fotokimia, dan pemanasan global. Berdasarkan nilai analisis dampak pada Tabel 3, dapat dilihat bahwa dampak tertinggi adalah pemanasan global dan dampak terendah adalah oksidasi fotokimia.

Tabel 4. Perhitungan Analisis Dampak Produksi PLEM menggunakan software OpenLCA

No	Nama	Kategori	Jumlah	Hasil
1	<i>Abiotic depletion</i>	–	–	0,000000 kg Sb eq
2	<i>Abiotic depletion (Fossil fuels)</i>	–	–	0,000000 MJ
3	<i>Acidification</i>	–	–	0,000010 kg SO ₂ eq
4	<i>Eutrophication</i>	–	–	0,0360126 kg PO ₄ eq
5	<i>Fresh water aquatic ecotoxicity</i>	–	–	0,000019 kg 1,4-DCB eq
6	<i>Global warming (GWP100a)</i>	–	–	2573,30034 kg CO ₂ eq
7	<i>Human toxicity</i>	–	–	0,000009 kg 1,4-DCB eq
8	<i>Marine aquatic ecotoxicity</i>	–	–	0,000000 kg 1,4-DCB eq
9	<i>Ozone layer depletion (ODP)</i>	–	–	0,000000 kg CFC-11 eq
10	<i>Photochemical oxidation</i>	–	–	0,00080028 kg C ₂ H ₄ eq
11	<i>Terrestrial ecotoxicity</i>	–	–	0,000000 kg 1,4-DCB eq

Berikut ini adalah dampak yang dihasilkan dari proses produksi PLEM.

Eutrofikasi

Sumber pencemar pada eutrofikasi berasal dari penggunaan bahan bakar, yaitu solar, selama tahap proses pemotongan, pembengkokan, dan *fitting*/pengelasan. Ketiga proses ini menghasilkan nilai dampak eutrofikasi sebesar 0,0360126 kg PO₄ eq. Eutrofikasi adalah suatu proses di mana lingkungan perairan, terutama danau, sungai, atau laut, menjadi terlalu kaya akan N₂O dan fosfor. Penggunaan bahan bakar solar, meskipun tidak terkait langsung dengan eutrofikasi, dapat memberikan dampak tidak langsung dalam meningkatkan eutrofikasi dan menurunkan kualitas udara. Proses produksi ini berlokasi dekat laut sehingga emisi yang dihasilkan selama proses produksi, seperti N₂O, dapat bereaksi dengan udara dan air untuk membentuk senyawa nitrogen dan sulfur. Ketika senyawa ini masuk ke dalam air, senyawa tersebut dapat bertindak sebagai nutrisi tambahan bagi mikroorganisme perairan, mempercepat pertumbuhan alga yang dapat mengurangi oksigen dalam air dan menurunkan kualitas air. Selain itu dampak eutrofikasi juga dapat mengurangi keanekaragaman hayati.

Oksidasi fotokimia

Oksidasi fotokimia adalah jenis polusi udara yang terbentuk di troposfer yang disebabkan oleh adanya reaksi metana yang terbentuk dari gas buang yang dihasilkan oleh alat berat yaitu forklift yang menggunakan bahan bakar solar. Dampak pada oksidasi fotokimia

yang dihasilkan dengan menggunakan perhitungan pada software *OpenLCA* yaitu sebesar 0.00080028 kg C₂H₄ eq. *Photochemical oxidation* atau asap fotokimia ini dapat menyebabkan masalah pada kesehatan seperti pernapasan serta iritasi mata. Pada penelitian ini proses produksi yang menghasilkan dampak photochemical oxidation adalah proses *cutting*, *bending* dan *fitting/welding*. Hal ini disebabkan oleh ketiga proses tersebut yang menghasilkan emisi CH₄ dari gas buang yang ditimbulkan oleh penggunaan peralatan berat, khususnya forklift.

Pemanasan Global

Global warming potential (GWP) adalah ukuran seberapa besar suatu zat kimia berkontribusi terhadap pemanasan global. Dampak kategori ini dapat mengubah iklim global akibat adanya zat kimia yang berkontribusi dalam menjebak panas di Bumi. Faktor karakterisasi untuk dampak pemanasan global dihitung berdasarkan massa gas yang dilepaskan ke udara, dinyatakan dalam kg CO₂ eq ke udara/kg. Dalam penelitian ini, dampak pemanasan global berasal dari emisi yang bersumber dari gas buang kendaraan yang menghasilkan karbon dioksida. Hasil analisis menunjukkan bahwa dampak GWP merupakan yang tertinggi dari dua dampak yang telah dijelaskan sebelumnya, yaitu sebesar 2.573,30034 kg CO₂ eq. Dampak pemanasan global ini dapat menyebabkan penurunan kualitas udara dan air akibat perubahan iklim, yang dapat memperburuk penyebaran penyakit, mengubah pola kejadian cuaca ekstrem, serta menyebabkan kenaikan permukaan air laut yang mengancam masyarakat pesisir dan ekosistem sekitarnya.

3.1.2 Analisa dampak produksi plem

Analisis LCA terhadap produksi PLEM menunjukkan bahwa kategori pemanasan global (*Global Warming Potential/GWP*) merupakan kontributor terbesar terhadap total dampak lingkungan, diikuti oleh eutrofikasi dan oksidasi fotokimia. Hasil ini selaras dengan pola umum industri manufaktur berbahan logam, khususnya baja, yang secara energi sangat intensif dan menghasilkan emisi tinggi selama tahap pemotongan, pembengkokan, dan pengelasan. Temuan ini konsisten dengan penelitian Strezov *et al.* (2021), yang menunjukkan bahwa produksi komponen berbahan baja memiliki beban GWP yang sangat dominan akibat konsumsi bahan bakar fosil dan proses pembakaran yang terjadi sepanjang rantai produksi. Penelitian tersebut menegaskan bahwa sumber utama GWP berasal dari pelepasan CO₂ selama proses fabrikasi serta penggunaan peralatan berat berbahan bakar solar, yang juga terlihat pada hasil analisis PLEM (Strezov *et al.*, 2021).

Selain itu, nilai eutrofikasi sebesar 0,0360126 kg PO₄-eq pada produksi PLEM juga menunjukkan pola yang sejalan dengan penelitian sebelumnya. Suer *et al.* (2022) menjelaskan bahwa proses pembakaran bahan bakar fosil pada industri baja menghasilkan NO_x dan SO_x yang dapat terlarut dalam air dan berkontribusi terhadap eutrofikasi di wilayah pesisir. Dalam konteks produksi PLEM, proses cutting, bending, dan pengelasan yang memanfaatkan bahan bakar solar menimbulkan emisi gas nitrogen yang selanjutnya dapat bereaksi di atmosfer dan terbawa ke lingkungan perairan di sekitar lokasi galangan kapal. Kesamaan pola ini menunjukkan bahwa sumber utama eutrofikasi pada kedua penelitian berasal dari proses pembakaran yang tidak efisien dan penggunaan energi berbasis fosil pada sektor manufaktur logam (Suer *et al.*, 2022).

Sementara itu, dampak oksidasi fotokimia pada penelitian ini sebesar 0,00080028 kg C₂H₄-eq berada pada kategori paling rendah, namun tetap relevan untuk dianalisis. Hasil tersebut sejalan dengan studi Ahmed *et al.* (2025), yang melakukan LCIA pada operasi peralatan berbahan bakar solar di fasilitas *offshore* dan menemukan bahwa pembentukan fotooksidan dipengaruhi oleh emisi hidrokarbon tak jenuh (misalnya CH₄ dan VOC) dari forklift, genset, dan peralatan angkut lainnya. Pada produksi PLEM, proses yang memicu fotooksidasi adalah *cutting*, *bending*, dan *welding* yang menggunakan forklift berbahan bakar solar, sehingga menghasilkan emisi hidrokarbon yang dapat bereaksi dengan sinar matahari dan membentuk foto-oksidan seperti ozon troposfer. Kesamaan ini menunjukkan bahwa meskipun kontribusinya kecil, kategori *photochemical oxidation* sangat sensitif terhadap efisiensi mesin dan kualitas bahan bakar (Ahmed *et al.*, 2025).

3.1.3 Rekomendasi

Berdasarkan hasil analisis dampak lingkungan, dapat dilihat bahwa limbah padat yang dihasilkan adalah limbah *scrap*. *Scrap* dapat digunakan sebagai bahan tambahan dalam proses produksi baja. Produksi baja dimulai dengan mengolah bijih besi menjadi besi. Besi yang telah diolah kemudian akan melalui *Electric Arc Furnace* (EAF) atau proses peleburan logam untuk membuat baja dengan mencampurkan besi dengan material lain seperti *scrap* dan bahan tambahan untuk menghasilkan baja, mengacu pada penelitian Sun *et al.* (2022) penerapan metode EAF berbasis *scrap* sejalan dengan skenario *International Energy Agency* (IEA) yang menempatkannya sebagai strategi utama untuk perbaikan efisiensi energi jangka pendek serta pencapaian target iklim 2°C dalam jangka menengah hingga Panjang. Selain mendukung target iklim, limbah *scrap* yang didaur ulang dengan proses yang tepat akan menghasilkan baja

dengan nilai ekonomi yang lebih tinggi (Chen *et al.*, 2022). Mengurangi limbah *scrap* juga dapat mengurangi permasalahan terkait limbah. Sebelum memulai proses produksi, *scrap* terlebih dahulu diklasifikasikan berdasarkan jenisnya dan komposisi kimia dari setiap jenis material *scrap* ditentukan. Selanjutnya, proses peleburan dilakukan dengan memasukkan logam ke dalam tungku listrik pada suhu 1600–1800°C hingga logam tersebut meleleh. Setelah logam meleleh, logam dapat dituangkan ke dalam cetakan dan keluar dalam bentuk billet (Teo *et al.*, 2020). Baja dapat didaur ulang sehingga dapat digunakan berulang kali. Dengan mendaur ulang produk baja, limbah konstruksi dapat dikurangi. Manfaatnya termasuk mengurangi biaya pengolahan limbah dan membantu memperpanjang umur layanan tempat pembuangan akhir (Imafuku, 2016).

4. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa proses produksi PLEM di industri galangan kapal berdasarkan analisis LCA memberikan kontribusi terhadap beberapa kategori dampak lingkungan. Nilai dampaknya meliputi 0,0360126 kg PO₄ eq untuk eutrofikasi, 0,00080028 kg C₂H₄ eq untuk oksidasi fotokimia, serta 2573,30034 kg CO₂ eq dalam kategori pemanasan global (GWP100a). Penelitian ini juga menegaskan pentingnya strategi pengelolaan limbah *scrap* sebagai upaya peningkatan keberlanjutan proses produksi. Salah satu langkah perbaikan yang direkomendasikan adalah mendaur ulang limbah *scrap* menjadi produk baja melalui proses pengolahan bijih besi dan peleburan menggunakan *Electric Arc Furnace* (EAF). Dengan mencampurkan besi yang telah diolah dengan *scrap* dan bahan tambahan lainnya sehingga dapat dihasilkan baja baru dengan nilai ekonomi yang lebih tinggi. Selain meningkatkan efisiensi material, praktik daur ulang ini juga berpotensi menekan volume limbah konstruksi dan mengurangi biaya pengelolaan limbah secara keseluruhan.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan apresiasi kepada seluruh pihak yang telah membantu dalam penyusunan artikel ini, terutama kepada UPN “Veteran” Jawa Timur. Ucapan terima kasih juga ditujukan kepada rekan-rekan dosen Program Studi Teknik Lingkungan dan semua pihak yang berkontribusi dalam penyediaan data dan informasi. Semoga artikel ini dapat menjadi referensi yang berharga bagi perkembangan penelitian di bidang terkait.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmed, S., Li, T., Li, S. Y., Chen, R. (2025). Comparative life cycle impact assessment of offshore support vessels powered by alternative fuels for sustainable offshore wind operations using machine learning. *Journal of Ocean Engineering and Science*, 10 (4), 561-579. <https://doi.org/10.1016/j.joes.2023.10.005>
- Alsadi, A. A., Matthews, J.C., (2022). Reduction of carbon emission is optimized during the life cycle of commonly used force main pipe materials. *Front. Water* 4, 735519. <https://doi.org/10.3389/FRWA.2022.735519/BIBTEX>
- Chen, Y., Ryan, S., Silaen, A.K., Zhou, C.Q., (2022). Simulation of scrap melting process in an ac electric arc furnace: cfd model development and experimental validation. *Metall Mater Trans B*, 53, 2675–2694. <https://doi.org/10.1007/S11663-022-02559-6/METRICS>
- Faturahman, I., Ikhwan, H., (2024). Pipeline End Manifold (PLEM) structural response analysis due to the settlement process. *International Journal of Offshore and Coastal Engineering*, 8 (2), 101–107.
- Hong, Z., Zhou, Z., Liu, W., Yan, Y., Fu, D., Yan, S., (2020). Analysis of walking rate for subsea pipelines neighbouring the pipeline end terminations/pipeline end manifolds. *Ocean Engineering*, 218, 108087. <https://doi.org/10.1016/J.OCEANENG.2020.108087>
- IEA, 2023. World Energy Outlook 2023 | Enhanced Reader. World Energy Outlook 2023 23–28.
- Imafuku, K., 2016. The Japan Iron and Steel Federation & Japanese Society of Steel Construction. Japan Iron Steel Fed. Japanese Soc. Steel Constr. 5.
- IPCC. (2019). *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. IPCC. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/index.html>
- Liu, H., Li, Q., Li, G., Ding, R. (2021). Life Cycle Assessment of Environmental Impact of Steelmaking Process. *Hindawi Complexity*, Volume 2020, Article ID 8863941. <https://doi.org/10.1155/2020/8863941>
- Ma, Q., Liang, W., Zhu, Y., Zhao, C., (2018). Design and analysis of subsea manifold piping systems. *2018 5th International Conference on Information Science and Control Engineering (ICISCE)*, Zhengzhou, China, 689–693. <https://doi.org/10.1109/ICISCE.2018.00148>
- Muhyinsyah, A., Witono, J. A., Santosa, E., (2021). Life cycle assessment of natural gas and crude oil: case study in PT Pertamina Hulu Mahakam – BSP Site. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci*, 753, 012037. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/753/1/012037>

- Pacheco, A. de A., do Nascimento, L. S., Faisca, R. G., (2020). Comparative study of design methodologies regarding a shallow foundation of a pipeline end manifold (PLEM). *Rio Oil Gas Expo Conf.* <https://doi.org/10.48072/2525-7579.rog.2020.191>
- Strezov, V., Evans, A., & Evans, T. (2021). Life cycle impact of metal production industries. *Scientific Reports*, 11, 16455. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-95106-6>
- Sotoodeh, K., (2020). Manifold Technology in the Offshore Industry. *American Journal of Marine Science*, 8 (1), 14–19. <https://doi.org/10.12691/marine-8-1-3>
- Sotoodeh, K., (2019). A review on subsea process and valve technology. *Mar. Syst. Ocean Technol*, 14, 210–219. <https://doi.org/10.1007/S40868-019-00061-4/METRICS>
- Suer, J., Traverso, M., Jäger, N. (2022). Review of life cycle assessments for steel and environmental analysis of future steel production scenarios. *Sustainability*, 14, 14131. <https://doi.org/10.3390/su142114131>
- Sun, Y., Wang, S., Zhang, L., & Liu, X. (2022). Decarbonizing the iron and steel sector for a 2°C target using a transformation model. *Nature Communications*, 13, 5621. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-33233-w>
- Teo, P. Ter, Zakaria, S.K., Salleh, S.Z., Taib, M.A.A., Sharif, N.M., Seman, A.A., Mohamed, J.J., Yusoff, M., Yusoff, A.H., Mohamad, M., Masri, M.N., Mamat, S., (2020). Assessment of Electric Arc Furnace (EAF) steel slag waste's recycling options into value added green products: A review. *Metals*, 2020, 10(10), 1347; <https://doi.org/10.3390/met10101347>
- Zubail, A., Traidia, A., Masulli, M., Vatopoulos, K., Villette, T., Taie, I., (2021). Carbon and energy footprint of nonmetallic composite pipes in onshore oil and gas flowlines. *Journal of Cleaner Production*, 305. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.127150>