

ISSN (ONLINE) 2598-9936



INDONESIAN JOURNAL OF INNOVATION STUDIES
PUBLISHED BY
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SIDOARJO

Table Of Contents

Journal Cover	1
Author[s] Statement.....	3
Editorial Team	4
Article information	5
Check this article update (crossmark)	5
Check this article impact	5
Cite this article.....	5
Title page.....	6
Article Title	6
Author information	6
Abstract	6
Article content	7

Originality Statement

The author[s] declare that this article is their own work and to the best of their knowledge it contains no materials previously published or written by another person, or substantial proportions of material which have been accepted for the published of any other published materials, except where due acknowledgement is made in the article. Any contribution made to the research by others, with whom author[s] have work, is explicitly acknowledged in the article.

Conflict of Interest Statement

The author[s] declare that this article was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest.

Copyright Statement

Copyright © Author(s). This article is published under the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) licence. Anyone may reproduce, distribute, translate and create derivative works of this article (for both commercial and non-commercial purposes), subject to full attribution to the original publication and authors. The full terms of this licence may be seen at <http://creativecommons.org/licences/by/4.0/legalcode>

Indonesian Journal of Innovation Studies

Vol. 27 No. 4 (2026): October
DOI: 10.21070/ijins.v27i4.2276

EDITORIAL TEAM

Editor in Chief

Dr. Hindarto, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

Managing Editor

Mochammad Tanzil Multazam, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

Editors

Fika Megawati, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

Mahardika Darmawan Kusuma Wardana, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

Wiwit Wahyu Wijayanti, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

Farkhod Abdurakhmonov, Silk Road International Tourism University, Uzbekistan

Bobur Sobirov, Samarkand Institute of Economics and Service, Uzbekistan

Evi Rinata, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

M Faisal Amir, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

Dr. Hana Catur Wahyuni, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

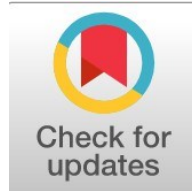
Complete list of editorial team ([link](#))

Complete list of indexing services for this journal ([link](#))

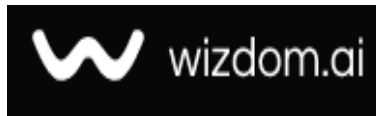
How to submit to this journal ([link](#))

Article information

Check this article update (crossmark)



Check this article impact (*)



Save this article to Mendeley



(*) Time for indexing process is various, depends on indexing database platform

Life Cycle Eco Cost Reveals Ecotoxicity Hotspots in Combined Cycle Power Generation : Analisis Biaya Ekologis Sepanjang Siklus Hidup Mengungkap Titik-Titik Rawan Ekotoksitas dalam Pembangkit Listrik Siklus Gabungan

Ade Nova Rahmadhani, 22032010193@student.upnjatim.ac.id (*)

Program Studi Teknik Industri, Universitas Pembangunan Nasional Veteran Jawa Timur, Indonesia

Rusindiyanto Rusindiyanto, Rusindiyanto.ti@upnjatim.ac.id

Program Studi Teknik Industri, Universitas Pembangunan Nasional Veteran Jawa Timur, Indonesia

(*) Corresponding author

Abstract

General Background: Combined-cycle electricity generation supports energy supply but relies on natural gas and High-Speed Diesel, producing emissions, wastewater, and hazardous waste that require environmental control. **Specific Background:** PLN Indonesia Power UBP Grati operates a gas-and-steam power plant in which internal generation activities contribute to climate change, ecotoxicity, and other environmental categories. **Knowledge Gap:** The ecological burden and associated monetary environmental cost of these gate-to-gate generation processes require systematic quantification to support process-level improvement. **Aims:** This study applied Life Cycle Assessment with a gate-to-gate boundary, SimaPro 10, and Eco-Indicator 99 to identify dominant environmental categories, calculate eco-cost, and assess eco-efficiency. **Results:** Total eco-cost reached IDR 2,127,458, comprising IDR 2,047,455 for human health, IDR 54,629 for ecosystem quality, and IDR 25,374 for resources. Ecotoxicity recorded the highest weighting value at 108 Pt, while the Eco-Efficiency Index, Eco-Cost Value Ratio, and Eco-Efficiency Ratio Rate were 32.84, 0.030, and 0.7%, respectively. **Novelty:** The study integrates gate-to-gate LCA, eco-cost, and eco-efficiency indicators within the operational context of UBP Grati. **Implications:** The findings support solar energy use, combustion management, routine maintenance, and activated-carbon treatment of wastewater as environmental improvement options identified in the study.

Highlights:

- ♦ Ecotoxicity recorded the highest weighting value at 108 Pt.
- ♦ The total monetary environmental burden reached IDR 2,127,458.
- ♦ EEI was 32.84, EVR 0.030, and EER 0.7%.

Keywords: Eco Cost, Green Manufacturing, Life Cycle Assessment, PLTGU, Simapro

Published date: 2026-09-24

Pendahuluan

Energi listrik merupakan salah satu kebutuhan yang mendukung berbagai aktivitas masyarakat, baik dalam kehidupan sehari-hari maupun kegiatan industri. Perkembangan teknologi dan penerapan Industri 4.0 turut meningkatkan kebutuhan terhadap ketersediaan energi listrik yang andal dan berkelanjutan. Kondisi tersebut menjadikan sektor pembangkitan listrik memiliki peran penting dalam menyediakan energi untuk memenuhi kebutuhan masyarakat serta menunjang aktivitas ekonomi dan industri. PLN Indonesia Power UBP Grati adalah salah satu pusat pembangkit listrik yang membantu memenuhi kebutuhan energi listrik masyarakat. Unit ini mengoperasikan Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU) dengan menggunakan gas sebagai bahan bakar untuk proses produksi energi listrik. Oleh karena itu, kegiatan operasional UBP Grati berperan dalam mendukung kelanjutan dan keandalan pemasokan listrik. Pada penelitian terdahulu menurut [1] di PLN Nusantara Power UP Cirata hasil penelitian sebelumnya pada pembangkit listrik tenaga air di PT PLN Nusantara Power UP Cirata menunjukkan adanya dampak lingkungan yang cukup besar dari aktivitas pembangkitan listrik. Reservoir Cirata diidentifikasi sebagai bagian yang memberikan kontribusi dampak paling dominan atau hotspot, yang salah satunya berkaitan dengan penggunaan bahan bakar diesel. Dampak lingkungan yang teridentifikasi meliputi potensi pemanasan global, penipisan lapisan ozon, pengasaman, serta eutrofikasi. Dengan kontribusi terbesar berasal dari penggunaan bahan bakar diesel dan oli turbin. Upaya pengurangan dampak ini penting untuk mendukung keberlanjutan energi dan pengurangan emisi di sektor hydropower Indonesia. Sedangkan menurut [2]. Metode ini sangat efektif digunakan dalam penilaian siklus hidup (*life cycle assessment*) untuk mengevaluasi dampak lingkungan dari aktivitas manufaktur produk komponen cylinder head yang melibatkan proses casting, machining, dan engine assy. Metode yang digunakan adalah EDIP. Kategori dampak lingkungan yang teridentifikasi mencakup: *human toxicity water*, *ecotoxicity soil chronic*, *ozone formation (vegetation)*, *global warming 100a* [3].

Konsep manufaktur berwawasan lingkungan diarahkan pada pengelolaan kegiatan produksi melalui optimalisasi pemakaian sumber daya, penekanan jumlah residu yang terbentuk, serta pemilihan material dengan konsekuensi ekologis yang lebih rendah tanpa mengorbankan mutu maupun fungsi keluaran. Penerapannya dapat diwujudkan melalui pemanfaatan sumber energi yang lebih bersih, pengembangan produk berorientasi lingkungan, dan pelaksanaan aktivitas operasi dengan dampak ekologis yang lebih terkendali. Agar pendekatan tersebut berjalan secara berkelanjutan, penyempurnaan terhadap produk maupun proses perlu dilakukan secara berkala dengan memasukkan pertimbangan lingkungan sejak fase perancangan sampai berakhirnya masa pemanfaatan produk [4].

Pengeluaran akibat beban ekologis merepresentasikan nilai moneter yang diperlukan untuk menangani konsekuensi terhadap lingkungan yang teridentifikasi melalui evaluasi daur hidup. Nilai yang pada awalnya diperoleh dalam mata uang Euro selanjutnya dialihkan ke Rupiah agar besaran kerugian ekologis dapat dinilai menggunakan dasar mata uang yang seragam. Sementara itu, evaluasi biaya dan manfaat dipakai untuk menentukan kelayakan suatu program melalui perbandingan antara seluruh pengorbanan ekonomi dengan keuntungan yang diperoleh. Pelaksanaannya mencakup penentuan batas program, estimasi pengeluaran, pengukuran manfaat, serta penghitungan hubungan antara kedua komponen tersebut. Unsur biaya dapat meliputi modal pada tahap awal, tambahan pengeluaran operasional, dan kemungkinan munculnya gangguan selama penerapan program.

PLN Indonesia Power UBP Grati mengoperasikan pembangkit tenaga gas dan uap (PLTGU). Sebagai penyedia energi listrik, PLN menghadapi kebutuhan pasokan yang terus berkembang. Aktivitas pembangkitan masih menggunakan *High Speed Diesel* (HSD) dan gas sebagai sumber energi. Penggunaan sumber energi fosil tersebut memunculkan pelepasan senyawa ke udara, terutama CO₂, SO₂, dan NO_x, sehingga dapat meningkatkan tekanan terhadap kondisi lingkungan sekitar. Selain emisi atmosfer dan pemanasan global dari proses mesin pembangkit energi listrik, kegiatan PLTGU turut menghasilkan limbah cair dan limbah B3 yang dapat memberikan kategori dampak berupa *ecotoxicity* [5][6]. Permasalahan ini memerlukan pengendalian agar tidak menimbulkan gangguan terhadap lingkungan.

Pendekatan penilaian daur hidup dapat dimanfaatkan untuk memetakan konsekuensi ekologis yang menguntungkan maupun merugikan dari suatu aktivitas atau produk, mengenali ruang peningkatan proses, membandingkan sejumlah alternatif, serta mengkuantifikasi besarnya beban terhadap lingkungan [7]. Penerapannya diarahkan untuk menelusuri kontribusi setiap unsur dalam rangkaian produksi sehingga sumber kerusakan dapat diketahui dan ditekan. Melalui penelaahan secara menyeluruh, informasi mengenai konsekuensi ekologis pada setiap tahapan dapat diperoleh dan selanjutnya dijadikan dasar dalam menentukan inovasi maupun tindakan korektif yang paling sesuai untuk meningkatkan performa lingkungan organisasi [8][9]. *Eco-Value Ratio* (EVR) merupakan indikator tanpa dimensi yang digunakan untuk menggambarkan keterkaitan antara aspek keuntungan dan aspek lingkungan dalam kerangka Triple P yang turut mempertimbangkan unsur manusia [10]. Status EEI dapat dikelompokkan ke dalam tiga kondisi. Nilai yang melebihi 1 menunjukkan bahwa produk memenuhi aspek ekonomi sekaligus keberlanjutan. Rentang nilai 0 sampai 1 mengindikasikan bahwa aspek ekonomi telah terpenuhi, namun unsur keberlanjutannya belum tercapai. Adapun nilai di bawah 0 menandakan bahwa kedua aspek tersebut belum dapat dipenuhi [11]. Nilai EER digunakan sebagai indikator akhir untuk melihat tingkat eko-efisiensi suatu proses dengan mempertimbangkan selisih antara nilai bersih produk dan beban biaya ekologis yang timbul selama kegiatan produksi [12]. Definisi limbah (*waste*) umumnya mengacu pada kriteria objektif dan/atau subjektif. Untuk menghindari adanya perbedaan persepsi yang bersifat subjektif, limbah sebaiknya didefinisikan seobjektif mungkin [13]. AMDAL berfungsi sebagai instrumen pengelolaan untuk menekan konsekuensi merugikan serta mengendalikan risiko lingkungan melalui prosedur dan perangkat hukum yang berlaku [14]. Salah satu strategi utama adalah peningkatan efisiensi energi, yaitu dengan mengurangi jumlah energi yang dibutuhkan untuk menghasilkan produk atau menjalankan proses produksi [15].

Metode

Kajian ini menerapkan kerangka LCA yang dilaksanakan melalui empat fase utama, yakni penetapan sasaran beserta cakupan sistem, penyusunan inventori daur hidup, evaluasi konsekuensi lingkungan, dan penafsiran hasil. Sesudah keseluruhan fase tersebut diselesaikan, besaran *eco-cost* dihitung pada bagian evaluasi dampak. *Eco-cost* dipakai untuk merepresentasikan beban ekonomi yang perlu ditanggung guna mencegah atau menghindari kemungkinan terjadinya kerusakan terhadap lingkungan. Selanjutnya, tingkat eko-efisiensi ditentukan berdasarkan selisih nilai bersih produk terhadap biaya ekologis proses, kemudian besaran tersebut dibandingkan dengan nilai bersih produk.

Pengolahan informasi dilakukan melalui kerangka LCA dengan ruang analisis yang dibatasi pada kegiatan internal unit pembangkitan, sedangkan pemodelan data dikerjakan menggunakan *SimaPro* versi 10 developer dengan menggunakan database *simapro 10 premium* dengan metode analisis *impact assesmentnya eco indicator 99*. Terdapat 2 jenis data yang digunakan sebagai dasar dalam penelitian ini yaitu data primer dan data sekunder. Data primer didapatkan dengan observasi secara langsung dilapangan serta wawancara dengan petugas terkait sedangkan data sekunder didapatkan dari dokumen perusahaan. Pengambilan data dimulai pada bulan Novemver-Desember tahun 2025 sebagai data pendukung untuk penelitian ini. Tahap awal diarahkan untuk merumuskan sasaran, menetapkan unit fungsional, dan menentukan batas sistem. Berikutnya, inventori disusun dari data masukan berupa konsumsi gas alam, HSD, air, serta bahan kimia, sedangkan data keluaran mencakup emisi dan limbah. Konsekuensi ekologis dari seluruh aliran tersebut selanjutnya dievaluasi berdasarkan kategori dampaknya, kemudian hasil evaluasi ditafsirkan untuk menentukan sumber kontribusi dominan sekaligus menyusun alternatif peningkatan. Besaran yang diperoleh dari evaluasi dampak kemudian dipakai untuk menghitung *eco-cost* dan dilanjutkan dengan analisis biaya-manfaat, indeks eko-efisiensi, rasio nilai biaya ekologis, serta rasio eko-efisiensi agar performa ekonomi dan lingkungan dari kegiatan pembangkitan tenaga listrik dapat dinilai secara terpadu.

Hasil dan Pembahasan

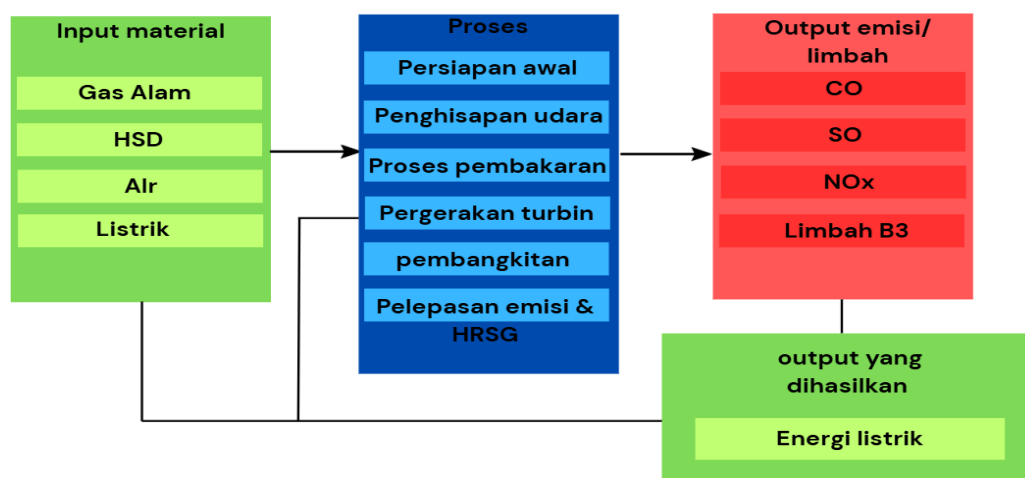
A. Life Cycle Assement

1. Goal and Scope

Tahap awal dalam kajian ini dilakukan dengan menetapkan tujuan, ruang lingkup, serta batas sistem yang menjadi dasar dalam pelaksanaan analisis. Penelitian ini memfokuskan pada penghitungan nilai *eco-cost*, mencari tahu tahapan dalam proses produksi yang memengaruhi lingkungan, serta menyusun beberapa alternatif peningkatan untuk mengurangi dampak negatif yang timbul dari kegiatan menghasilkan listrik. Analisis dilakukan dengan menerapkan batas sistem *gate-to-gate*, yaitu dengan membatasi fokus penelitian hanya pada semua aktivitas yang berlangsung di dalam lingkungan pembangkit itu sendiri. Proses yang dianalisis mencakup penggunaan bahan dan energi sebagai masukan ke dalam sistem, cara pembangkit beroperasi untuk menghasilkan listrik, hingga terbentuknya hasil berupa energi listrik, emisi, dan limbah. Dengan batasan itu, analisis bisa lebih fokus pada dampak lingkungan yang timbul dari kegiatan sehari-hari pembangkit tanpa melibatkan tahapan di luar sistem yang sudah ditentukan.

2. Life Cycle Inventory

Tahap inventarisasi dilakukan dengan mengidentifikasi dan mencatat seluruh input yang digunakan selama proses pembangkitan, baik berupa bahan, energi, maupun komponen lain yang berkaitan dengan kegiatan operasional. Data yang diperoleh selanjutnya disusun secara sistematis sebagai dasar dalam membangun model proses pada *SimaPro*. Hubungan antara input yang digunakan, tahapan proses pembangkitan, dan output yang dihasilkan dalam batas sistem penelitian ditampilkan pada Gambar 1.



Gambar 1 jenis input process output

3. Life Cycle Impact Assement

Pemodelan dampak lingkungan dilakukan menggunakan *SimaPro 10.1* versi *Developer* dengan metode *Eco-Indicator 99*. Analisis mencakup sebelas kategori dampak, meliputi *carcinogenics*, *respiratory organics*, *respiratory inorganics*, *climate change*, *radiation*, *ozone layer*, *ecotoxicity*, *acidification/eutrophication*, *land use*, *minerals*, dan *fossil fuels*. Hasil pemodelan dianalisis melalui tahap karakterisasi dan normalisasi untuk mengidentifikasi kontribusi dampak lingkungan dari proses pembangkitan energi listrik di PLN Indonesia Power.

a. Tahap Karakterisasi

Pada tahap karakterisasi, setiap aliran dalam inventori diklasifikasikan ke dalam kategori dampak yang sesuai berdasarkan faktor karakterisasi pada metode *Eco-Indicator 99*. Hasil pengolahan menggunakan *SimaPro 10.1* kemudian digunakan untuk menunjukkan besarnya kontribusi masing-masing aliran terhadap kategori dampak lingkungan:

- 1) dampak *carcinogenics* didapatkan sebesar 6,12E-6 DAILY. Pada kategori ini proses yang berkontribusi yakni pada proses fuel supply dan power generator dengan masing masing nilai sebesar 3,06E-6 DAILY
- 2) Sedangkan pada untuk dampak *resp.organics* sebesar 2,21E-7 DAILY. Pada kategori ini proses yang berkontribusi yakni pada proses fuel supply dan power generator dengan masing masing nilai sebesar 1,11E-7 DAILY.
- 3) Dampak kategori *climate change* mendapatkan nilai sebesar 0,000395 DAILY pada proses power generator.
- 4) Kemudian pada dampak kategori *radiation*, *land use* dan *minerals* tidak ada nilai yang dihasilkan
- 5) Dampak kategori *ozone layer* didapatkan total nilai sebesar 9,94E-12 DAILY. Pada kategori ini proses yang berkontribusi yakni fuel supply dan power generator dengan masing masing nilai 4,97E-12 DAILY.
- 6) Pada kategori *ecotoxicity* didapatkan nilai sebesar 1,55E4 PAF*m2yr. Pada kategori ini proses terbesar yang berkontribusi pada proses waste treatment dengan nilai 1,55E4 PAF*m2yr.
- 7) Dampak kategori *acidification/eutrophication* mendapatkan nilai yang sama dari kedua proses sebesar 0,827 PDF*m2yr denngan total nilai sebesar 1,65 PAF*m2yr.
- 8) Kategori *fossil fuels* didapatkan total nilai sebesar 299 MJ Surplus dengan nilai dari kedua proses yakni di proses fuel supply sebesar 150 MJ Surplus dan power generator sebesar 150 MJ Surplus.

b. Tahap Normalisasi

Tahapan ini bertujuan untuk mendapatkan nilai komparatif yang sama dari masing-masing jenis dampak yang ada sehingga memudahkan saat interpretasi yang lebih lanjut. Setelah tahap *charaterization* selanjutnya dilakukan tahap *normalization*, dimana dampak keseluruhan dinilai akan dilakukan perbandingan dan disederhanakan dan dibuat atas dasar ukuran yang sama. Selain itu, hasil *normalization* disajikan dalam bentuk ke tabel 1 yang menyajikan informasi mengenai besaran dampak kategori tiap proses dengan satuan unit masing masing *impact category*

Tabel 1. Hasil Normalisasi

No	Impact Category	Total
1	<i>Carcinogenics</i>	$6,92 \times 10^{-4}$
2	<i>Respiratory Organics</i>	$2,5 \times 10^{-5}$
3	<i>Respiratory Inorganics</i>	$1,06 \times 10^{-1}$
4	<i>Climate Change</i>	$4,52 \times 10^{-1}$
5	<i>Ozone Layer</i>	$1,12 \times 10^{-9}$
6	<i>Ecotoxicity</i>	$2,71 \times 10^{-1}$
7	<i>Accidification/Eutrophication</i>	$2,89 \times 10^{-4}$
8	<i>Fossil Fuels</i>	$5,35 \times 10^{-2}$

c. Tahap Weighting

Berdasarkan hasil normalisasi yang ditampilkan pada Tabel 1, kategori dampak dengan nilai paling tinggi adalah kategori *fossil fuels* memberikan nilai dampak sebesar 0,0535, sedangkan *climate change* tercatat sebesar 0,0452. Adapun nilai sebesar 0,106 merupakan kontribusi dari kategori dampak lainnya yang dianalisis. Selain kategori tersebut, terdapat beberapa kategori dengan nilai kontribusi yang lebih kecil, yaitu *carcinogenics* sebesar 0,000692, *acidification/eutrophication* sebesar 0,000289, dan *respiratory organics* sebesar 0,000025, serta *ozone layer* sebesar $1,12 \times 10^{-9}$.

Tabel 2. Hasil Weighting

Select	Impact category	Unit	Total	Fuel Supply	Power Generator	Waste Treatment
☒	Total	Pt	180	6.73	64.7	108
☒	Carcinogens	Pt	0.277	0.138	0.138	x
☒	Respiratory organics	Pt	0.01	0.005	0.005	x
☒	Respiratory inorganics	Pt	42.2	0.988	41.2	x
☒	Climate change	Pt	18.1	0.177	17.9	x
☒	Radiation	Pt	x	x	x	x
☒	Ozone layer	Pt	4.5E-7	2.25E-7	2.25E-7	x
☒	Ecotoxicity	Pt	108	0.00834	0.00834	108
☒	Acidification/ Eutrophication	Pt	0.116	0.0578	0.0578	x
☒	Land use	Pt	x	x	x	x
☒	Minerals	Pt	x	x	x	x
☒	Fossil fuels	Pt	10.7	5.35	5.35	x

Weighting atau pembobotan merupakan tahapan dalam analisis dampak lingkungan yang dilakukan dengan memberikan bobot pada masing-masing kategori dampak. Berdasarkan hasil *weighting* pada Tabel 2, kategori *ecotoxicity* menunjukkan nilai tertinggi, yaitu sebesar 108 Pt. Hasil analisis menunjukkan bahwa beberapa kategori memberikan kontribusi dampak yang berbeda-beda. Nilai *respiratory inorganics* tercatat sebesar 42,2 Pt, sedangkan *climate change* mencapai 18,1 Pt dan *fossil fuels* sebesar 10,7 Pt. Adapun kategori lainnya memiliki nilai yang lebih rendah, yaitu *carcinogenics* sebesar 0,277 Pt, *acidification/eutrophication* sebesar 0,116 Pt, serta *respiratory organics* dengan nilai 0,01 Pt. Adapun kategori *ozone layer* menunjukkan nilai yang sangat kecil, yaitu sebesar $4,5 \times 10^{-7}$ Pt. Pada kategori *climate change*, *land use*, dan *minerals* tidak terdapat nilai *impact category* yang dihasilkan.

Tabel 3. Single Score

Damage category	Unit	Total	Fuel Supply	Power Generator	Waste Treatment
Total	Pt	180	6.73	64.7	108
Human Health	Pt	60.6	1.31	59.3	x
Ecosystem Quality	Pt	108	0.0662	0.0662	108
Resources	Pt	10.7	5.35	5.35	x

d. Tahap Single Score

Berdasarkan hasil *single score* pada Tabel 3, terdapat tiga *damage category*, yaitu *human health*, *ecosystem quality*, dan *resources*. Nilai tertinggi terdapat pada *ecosystem quality* sebesar 108 Pt, diikuti *human health* sebesar 60,6 Pt dan *resources* sebesar 10,7 Pt. Kontribusi terbesar pada *ecosystem quality* berasal dari proses *waste treatment* sebesar 108 Pt, sedangkan *power generator* memberikan kontribusi sebesar 59,3 Pt pada *human health*. Pada kategori *resources*, proses *fuel supply* dan *power generator* memberikan kontribusi sebesar 5,35 Pt. Sementara itu, kontribusi *fuel supply* pada *human health* sebesar 1,31 Pt serta kontribusi *fuel supply* dan *power generator* pada *ecosystem quality* sebesar 0,0662 Pt. Hasil tersebut menunjukkan bahwa *waste treatment* dan *power generator* merupakan proses yang memberikan kontribusi utama terhadap dampak lingkungan pada sistem yang dianalisis.

e. Eco Efficiency Index

Tabel 4. Hasil Perhitungan EEI energi listrik

No	Impact Category	Total
1	Harga Jual	28.518.228.000
2	Biaya Produksi	28.448.351.396
3	Net Value	69.876.604
4	Eco-Cost	2.127.458
5	EEI	32,84

Berdasarkan hasil perhitungan pada Tabel 4, diperoleh nilai *Eco-Efficiency Index* (EEI) sebesar 32,84. Nilai EEI > 1 menunjukkan bahwa produk berada pada kategori *affordable* dan *sustainable*, yang mengindikasikan adanya efisiensi ekonomi serta nilai ekonomi yang lebih besar dibandingkan dampak lingkungan yang ditimbulkan. Meskipun demikian, proses pembangkitan listrik tetap menghasilkan emisi udara dan limbah operasional yang berpotensi memberikan dampak terhadap lingkungan dan ekosistem.

f. Eco Cost Value Ratio

Tabel 5. Hasil perhitungan EVR energi listrik

No	Impact Category	Total
1	Biaya Produksi	28.448.351.396
2	Net Value	69.876.604
3	Eco-Cost	2.127.458
4	EVR	0,030

Berdasarkan hasil perhitungan pada Tabel 5, diperoleh nilai *Eco-Cost Value Ratio* (EVR) sebesar 0,030. Nilai EVR yang rendah menunjukkan bahwa biaya lingkungan relatif kecil dibandingkan dengan nilai ekonomi yang dihasilkan, sehingga proses produksi energi listrik memiliki tingkat efisiensi lingkungan yang baik.

g. Eco Efficiency Ratio

Tabel 6. Hasil perhitungan EER energi listrik

No	Impact Category	Total
1	Biaya Produksi	28.448.351.396
2	Net Value	69.876.604
3	Eco-Cost	2.127.458
4	EVR	0,7%

Berdasarkan hasil perhitungan pada Tabel 6, diperoleh nilai *Eco-Efficiency Ratio Rate* (EER) sebesar 0,7%. Nilai tersebut menunjukkan bahwa proses produksi energi listrik memiliki tingkat *eco-efficiency* yang tinggi, dengan beban lingkungan yang relatif kecil dibandingkan nilai ekonomi yang dihasilkan. Meskipun demikian, proses pembangkitan masih menghasilkan emisi dan limbah operasional yang berpotensi memberikan dampak terhadap lingkungan.

Simpulan

Berdasarkan hasil analisis *Life Cycle Assessment* (LCA) dengan pendekatan *gate-to-gate*, proses produksi energi listrik di PLN Indonesia Power UBP Grati terdiri atas tahapan input, proses, dan output yang menghasilkan energi listrik sebagai produk utama serta emisi gas buang dan limbah sebagai dampak lingkungan. Berdasarkan hasil analisis, nilai total *eco-cost* pada proses pembangkitan listrik tercatat sebesar Rp2.127.458. Nilai tersebut terbagi ke dalam tiga kategori, yaitu *human health* dengan nilai Rp2.047.455, *ecosystem quality* sebesar Rp54.629, serta *resources* sebesar Rp25.374. Upaya peningkatan kinerja lingkungan dapat dilakukan melalui beberapa alternatif, antara lain mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar konvensional dengan memanfaatkan sumber energi terbarukan, menjaga efisiensi proses pembakaran melalui pelaksanaan pemeliharaan mesin pembangkit secara rutin, dan mengoptimalkan pengolahan air limbah dengan penambahan karbon aktif. Penggunaan karbon aktif tersebut ditujukan untuk menurunkan konsentrasi logam berat dalam air limbah sebelum dialirkan ke lingkungan.

References

- Agung Agung et al., "Pendampingan IKM knalpot Purbalingga dengan penerapan green manufacturing guna meningkatkan kualitas dan efisiensi produksi," Jurnal Pengabdian Masyarakat dan Riset Pendidikan, vol. 4, no. 2, pp. 10284–10290, 2025, doi: 10.31004/jerkin.v4i2.3510.
- I. Adbaidainya, "Evaluation of green manufacturing implementation on regulation, costs, and knowledge," Jurnal Ekonomi dan Bisnis Airlangga, vol. 31, no. 1, pp. 64–73, May 2021, doi: 10.20473/jeba.v31i12021.64-73.
- Aviasti, A. Rukmana, A. Nupena, and R. Amaranti, "Analisis keterkaitan antara green design, green process, green dynamic capabilities, dan absorptive capacity pada perusahaan manufaktur," Jurnal Teknik Industri, vol. 17, no. 2, pp. 62–70, Mar. 2022, doi: 10.14710/jati.17.2.62-70.
- A. A. Fahmi, E. Hardinawati, and A. S. Putri, "Analysis of eco-efficiency level in tofu processing using the Life Cycle Assessment (LCA) method," E3S Web of Conferences, vol. 517, Art. no. 14004, Apr. 2024, doi: 10.1051/e3sconf/202451714004.
- W. Widiyarini, U. A. Rosalina, and S. Perdana, "Analisis cost benefit pada edukasi penerapan konsep 5S produksi mukena di Konveksi Roemah Dia," AJAD: Jurnal Pengabdian kepada Masyarakat, vol. 5, no. 3, pp. 548–555, Dec. 2025, doi: 10.59431/ajad.v5i3.656.
- N. Athirafitri, N. Indrasati, and A. Ismayana, "Analisis dampak pengolahan hasil perikanan menggunakan metode Life Cycle Assessment (LCA): Studi literatur," Jurnal Teknologi Industri Pertanian, vol. 31, no. 3, pp. 274–282, Dec. 2021, doi: 10.24961/j.tek.ind.pert.2021.31.3.274.
- S. A. Devi and M. Mirwan, "Analisis Life Cycle Assessment (LCA) pada proses produksi pupuk ZA II menggunakan metode ReCiPe 2016," INSOLOGI: Jurnal Sains dan Teknologi, vol. 2, no. 3, pp. 620–632, Jun. 2023, doi: 10.55123/insologi.v2i3.2074.
- D. P. Sari, N. A. Masruroh, A. Maria, and S. Asih, "Eco-efficiency comparative analysis of informal and formal smartphone recycling practices using Life Cycle Assessment," International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology, vol. 13, no. 3, 2023, doi: 10.18517/ijaseit.13.3.17452.
- S. Hartini, H. Prastawa, B. Tjahjono, and B. S. Ramadan, "Circular economy-based product substitution design rationale," Journal of Industrial Engineering and Management, vol. 15, no. 4, pp. 688–706, Nov. 2022, doi: 10.3926/jiem.4168.
- S. Hartini, P. A. Wicaksono, A. Purbasari, A. N. Fatlana, N. U. Handayani, and M. N. Rashif, "Eco-efficiency index of the recycling process of fuel husks into briquettes in tofu SMEs using life cycle assessment," IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, vol. 1268, no. 1, Art. no. 012073, 2023, doi: 10.1088/1755-1315/1268/1/012073.
- N. Susanto, T. T. Putranto, A. Ratih, and A. Pratiwi, "Pengukuran tingkat eko-efisiensi batik cap menggunakan metode Life Cycle Analysis (Studi kasus: Batik Encim pada Kampoeng Batik Kauman Pekalongan)," Jurnal Ilmu Lingkungan, vol. 20, no. 3, 2022, doi: 10.14710/jil.20.3.654-665.
- S. Hartini, H. Prastawa, B. Tjahjono, and B. S. Ramadan, "Circular economy-based product substitution design rationale," Journal of Industrial Engineering and Management, vol. 15, no. 4, pp. 688–706, Nov. 2022, doi: 10.3926/jiem.4168.
- M. Wiprächtiger, M. Haupt, M. Rapp, and S. Hellweg, "Waste not, want not—Ambiguities around waste and waste prevention," Resources, Conservation and Recycling, vol. 173, Art. no. 105742, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.resconrec.2021.105742.
- E. N. Karuniani, "Analisis mengenai dampak lingkungan (AMDAL) dalam pengelolaan lingkungan hidup," Badamai Law Journal, vol. 7, no. 2, Sep. 2022, doi: 10.32801/damai.v7i2.14873.
- E. Worrell and G. Boyd, "Bottom-up estimates of deep decarbonization of U.S. manufacturing in 2050," Journal of Cleaner Production, vol. 330, Art. no. 129758, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.129758.