

Perbandingan Dampak Lingkungan Porsi *Co-firing* pada PLTU Pulverized Coal 350 MW

Satria Rizki¹, Maria Anityasari², Abdul Basit³

^{1,2,3}Departemen Teknik Sistem dan Industri, Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem, Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Jl. Raya ITS, Keputih, Kec. Sukolilo, Surabaya, Jawa Timur 60111
Email: 6010241059@student.its.ac.id

ABSTRAK

Ketergantungan terhadap Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) berbahan bakar batubara di Indonesia menimbulkan permasalahan dampak lingkungan. Upaya pengurangan dampak lingkungan ini menjadi tantangan dalam menjaga keberlanjutan sistem kelistrikan tanpa mengganggu keandalan pasokan energi. Salah satunya langkah yang sudah dilakukan dengan penerapan *co-firing* pada PLTU. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perbandingan dampak lingkungan dari penerapan *co-firing* biomassa pada PLTU Pulverized Coal (PC) dengan variasi komposisi bahan bakar batubara jenis *low rank coal* dan *medium rank coal* serta biomassa berupa *sawdust*. Metode yang digunakan adalah *Life Cycle Assessment* dengan sistem *gate-to-gate* dan *functional unit* sebesar 1 kW energi listrik, serta penilaian dampak menggunakan metode ReCiPe2016 pada level *midpoint* dan *endpoint*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan biomassa secara bertahap mampu menurunkan dampak lingkungan, terutama terhadap pemanasan global, eutrofikasi, konsumsi sumber daya, serta toksisitas terhadap manusia dan ekosistem. Skenario terbaik diperoleh pada komposisi campuran dengan porsi biomassa sampai 15% yang menghasilkan dampak lingkungan paling rendah. Meskipun demikian, terdapat peningkatan pada beberapa kategori dampak seperti pembentukan partikulat halus dan toksisitas non-karsinogenik.

Kata kunci: *co-firing*, Biomassa, *Life Cycle Assessment*, PLTU.

ABSTRACT

Dependency on coal-fired power plants (CFPP) in Indonesia raises environmental concerns. Efforts to reduce this environmental impact pose a challenge in maintaining the sustainability of the electricity system without disrupting the reliability of the energy supply. One such step has been implemented through co-firing in CFPP. This study aims to analyze the comparative environmental impacts of implementing biomass co-firing in a 350 MW PC CFPP with varying fuel compositions of low-rank, medium-rank coal and sawdust biomass. The method used was a Life Cycle Assessment with a gate-to-gate approach and a functional unit of 1 kW of electrical energy. Impact assessments were carried out using the ReCiPe2016 method at the midpoint and endpoint levels. The results showed that gradual biomass addition can reduce environmental impacts, particularly on global warming, eutrophication, resource consumption, and human and ecosystem toxicity. The best scenario was achieved with a mixture composition containing the highest biomass proportion (15%), resulting in the lowest environmental impact. However, several impact categories increased, including fine particulate formation and non-carcinogenic toxicity.

Keywords: *co-firing*, biomass, life cycle assessment, coal-fired power plant.

Pendahuluan

Sektor pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) berbahan bakar batubara menjadi tulang punggung pasokan energi nasional di Indonesia [1]. Namun saat ini PLTU masih berkontribusi sangat signifikan terhadap emisi gas rumah kaca (GRK), partikel halus, dan zat lainnya [2], [3]. Hal ini sejalan dengan laporan bahwa sektor energi, khususnya pembangkit berbahan bakar fosil, merupakan penyumbang utama peningkatan emisi karbon global yang terus meningkat setiap tahunnya [4], [5], [6].

Kebijakan pemerintah melalui Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) tahun 2025 sampai dengan 2034 menunjukkan arah transisi energi nasional dengan sistem kelistrikan berbasis Energi Baru Terbarukan (EBT). Pada dokumen RUPTL itu, porsi pembangkit listrik dengan basis energi fosil akan mulai dikurangi secara bertahap untuk mendukung target *Net Zero Emission* (NZE) pada tahun 2060 [1]. Namun PLTU masih memegang peranan penting dalam menjaga keandalan pasokan listrik, terutama pada sistem wilayah yang belum sepenuhnya siap menerima terdapat EBT. Pemerintah mendorong agar PLTU yang masih beroperasi dengan melakukan optimalisasi teknologi dan operasional untuk menekan dampak lingkungan. Dengan adanya kebijakan RUPTL yang lebih berpihak pada pembangkit ramah lingkungan.

Sebagai langkah respons terhadap kebijakan transisi energi yang tersebut, pemerintah dan internal PLN mendorong pengurangan emisi karbon dari pembangkit listrik dengan bahan bakar fosil atau batubara melalui berbagai pendekatan. Salah satu strategi yaitu dengan penerapan *co-firing*, yaitu penggunaan bahan bakar bersama antara batubara sebagai bahan bakar utama dengan biomassa sebagai bahan bakar pendamping untuk menghasilkan energi dengan emisi karbon yang lebih rendah. *Co-firing* tersebut menjadi salah satu solusi transisi dinilai efektif karena dapat diterapkan pada PLTU eksisting tanpa perlu membangun pembangkit baru.

Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa *co-firing* mampu menurunkan emisi GRK dan beberapa dampak lingkungan [7]. Studi oleh Nugraheni et al., (2023) melaporkan penurunan *Global Warming Potential* pada PLTU melalui *co-firing* dengan *sawdust* [7]. Kemudian penelitian lain oleh Lubis et al., (2025) di PLTU Pangkalan Susu menunjukkan penurunan efisiensi termal namun memberikan kontribusi signifikan terhadap penggunaan *green energy* [2]. Hasil serupa juga ditunjukkan dalam studi literatur yang menyatakan bahwa pencampuran biomassa dalam skema *co-firing* secara umum mampu menurunkan emisi gas buang seperti CO₂, NO_x, dan SO₂, meskipun besarnya penurunan sangat dipengaruhi oleh jenis biomassa dan rasio pencampurannya [8], [9].

Sebagian besar studi sebelumnya meneliti satu atau dua variasi rasio bahan bakar, atau berfokus pada aspek efisiensi termal. Penelitian ini untuk mengisi kesenjangan tersebut dengan membandingkan secara sistematis dampak lingkungan dari enam skenario rasio bahan bakar batubara LRC 100% (*Low Rank Coal*), hingga skenario kombinasi batubara LRC dan MRC (*Medium Rank Coal*) dengan *sawdust* hingga 15%. Pendekatan LCA dapat digunakan dalam mengevaluasi dampak lingkungan pada sistem energi, dengan metode ReCiPe2016 [10]. Evaluasi dilakukan menggunakan pendekatan *Life Cycle Assessment* (LCA) berbasis metode ReCiPe2016 pada level *midpoint* dan *endpoint* [11]. Meskipun penelitian mengenai *co-firing* biomassa pada PLTU telah banyak dilakukan, sebagian besar studi sebelumnya terbatas pada satu atau dua variasi porsi bahan bakar dan juga lebih berfokus pada penurunan emisi karbon atau efisiensi termal. Oleh karena itu, pada penelitian ini melakukan analisis komparatif enam skenario variasi bahan bakar yang mengombinasikan *Low Rank Coal* (LRC), *Medium Rank Coal* (MRC), dan biomassa *sawdust* hingga 15% pada PLTU *pulverized coal* 350 MW menggunakan metode ReCiPe2016 pada level *midpoint* dan *endpoint*, sehingga dapat memberikan evaluasi dampak lingkungan yang lebih komprehensif.

Dengan adanya penelitian ini diharapkan terdapat analisis komparatif berbasis *Life Cycle Assessment* (LCA) untuk mengevaluasi dampak lingkungan dari variasi porsi bahan bakar *co-firing* pada PLTU *pulverized coal*. Penelitian ini memberikan analisis komparatif terhadap enam skenario komposisi bahan bakar dengan menggunakan metode ReCiPe2016 pada level *midpoint* dan *endpoint*. Pendekatan tersebut memungkinkan evaluasi dampak lingkungan secara lebih menyeluruh terhadap kesehatan manusia, kualitas ekosistem, dan kelangkaan sumber daya berdasarkan kondisi operasional aktual pembangkit. Temuan ini diharapkan menjadi dasar ilmiah untuk pengambilan kebijakan energi, khususnya dalam konteks optimalisasi bauran energi terbarukan dan pengurangan emisi karbon secara bertahap tanpa mengganggu kestabilan sistem kelistrikan.

Metode Penelitian

Objek Penelitian

PLTU Pelabuhan Ratu saat ini telah mengimplementasikan *co-firing* biomassa berupa *sawdust* (serbuk gergaji) sebagai substitusi sebagian batubara dalam proses pembakaran. Biomassa (*sawdust*) yang digunakan diperoleh dari limbah hasil produksi pengrajin kayu di wilayah Kabupaten Sukabumi. Rasio *co-firing* yang telah diterapkan sampai dengan 5% *sawdust* [12]. Metode yang digunakan adalah *direct co-firing*, di mana *sawdust* dicampur langsung dalam sistem bahan bakar eksisting tanpa modifikasi besar terhadap peralatan.

Life Cycle Assessment

Penelitian ini menggunakan pendekatan *Life Cycle Assessment* (LCA) untuk mengevaluasi dan membandingkan dampak lingkungan dari pembakaran campuran batubara dan biomassa (*co-firing*) di PLTU Pelabuhan Ratu. LCA merupakan suatu metode yang sistematis untuk menilai aspek lingkungan dan potensi dampaknya yang terkait dengan suatu produk, proses, atau aktivitas sepanjang daur hidupnya. Pendekatan ini mengacu pada standar ISO 14040 dan ISO 14044 yang mencakup empat tahapan utama: *goal and scope definition*, *life cycle inventory analysis*, *impact assessment*, dan *interpretation* [13], [14].

Goal and Scoping

Berikut *goal and scoping*, *functional unit* yang digunakan:

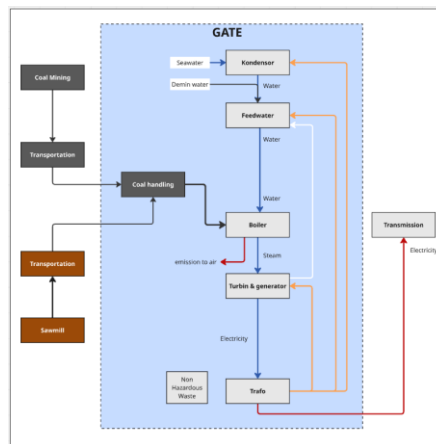
- *Goal*: membandingkan dampak lingkungan yang dihasilkan dari proses *co-firing* biomassa
- *Functional Unit*: Per 1 kw Listrik yang dihasilkan
- *Scoping*: *gate-to-gate*

PLTU Pelabuhan Ratu telah mengimplementasikan *co-firing* dengan komposisi 5% *sawdust* [12]. Namun penelitian ini membandingkan enam model skenario komposisi bahan bakar sebagai berikut:

Tabel 1. Skenario Komposisi Bahan Bakar

Skenario	Komposisi Bahan Bakar
S1	LRC 100%
S2	LRC 30% + MRC 70%
S3	LRC 40% + MRC 60%
S4	LRC 35% + MRC 60% + <i>Sawdust</i> 5%
S5	LRC 24% + MRC 66% + <i>Sawdust</i> 10%
S6	LRC 12% + MRC 73% + <i>Sawdust</i> 15%

Batasan sistem (*system boundary*) pada penelitian ini menggunakan pendekatan *gate-to-gate* seperti yang terlihat pada Gambar 1, yang mencakup tahapan proses mulai dari penerimaan bahan bakar, proses pembakaran di boiler, hingga proses konversi energi termal menjadi energi listrik pada unit pembangkit. Pendekatan ini dipilih karena penelitian difokuskan pada evaluasi dampak lingkungan selama proses operasional pembangkitan listrik di PLTU, tanpa mempertimbangkan tahapan tambang bahan bakar, distribusi bahan bakar, maupun distribusi energi listrik ke konsumen. Pendekatan LCA memungkinkan identifikasi aliran material, energi, serta emisi yang dihasilkan selama proses pembangkitan listrik sehingga dapat memberikan gambaran yang komprehensif mengenai dampak lingkungan dari masing-masing skenario bahan bakar. Kemudian membandingkan dampak lingkungan yang dihasilkan dari proses *co-firing* biomassa berdasarkan enam skenario komposisi bahan bakar pada Tabel 1, guna mengetahui pengaruh variasi rasio campuran *Low Rank Coal* (LRC), *Medium Rank Coal* (MRC), dan sawdust terhadap kategori dampak lingkungan pada level midpoint dan endpoint. Melalui pendekatan ini diharapkan dapat diperoleh skenario komposisi bahan bakar yang memiliki dampak lingkungan paling minim serta mendukung upaya dekarbonisasi sektor pembangkitan listrik. Pada penelitian dilakukan studi kasus di PLTU Pelabuhan Ratu sehingga hasil yang diperoleh belum tentu merepresentasikan seluruh karakteristik operasional PLTU lainnya. Selain itu, penelitian menggunakan beberapa asumsi operasional, seperti kondisi operasi pembangkit yang dianggap stabil.



Gambar 1. System Boundary

Life Cycle Inventory

Pada penelitian ini biomassa yang digunakan adalah biomassa jenis *sawdust* yang berasal dari limbah hasil produksi pengrajin kayu di wilayah Kabupaten Sukabumi [12]. Pemanfaatan sawdust sebagai bahan bakar biomassa dipilih karena ketersediaannya di wilayah sekitar PLTU serta memiliki potensi untuk dimanfaatkan sebagai sumber energi alternatif. Data inventori biomassa menggunakan database Ecoinvent3 yang tersedia pada perangkat lunak Simapro 9. Pada PLTU terjadi proses konversi energi dari bahan bakar berupa batubara dan biomassa menjadi energi termal melalui proses pembakaran di boiler, yang selanjutnya dikonversi menjadi energi mekanik pada turbin dan akhirnya menjadi energi listrik pada generator sebelum disalurkan ke sistem transmisi. Data inventori yang digunakan berupa data sekunder yang diperoleh dari Laporan Operasi PLN Indonesia Power UBP Pelabuhan Ratu dan data operasional pembangkit yang dikalkulasikan dalam satu periode operasi, kemudian dinormalisasi berdasarkan unit fungsi sebesar 1 kWh energi listrik yang dihasilkan [15]. Data tersebut seperti yang terlihat pada Tabel 2 meliputi konsumsi bahan bakar, kebutuhan proses, penggunaan air, konsumsi energi pendukung, serta output berupa abu dan energi listrik. Inventori ini digunakan sebagai dasar dalam proses *Life Cycle Impact Assessment* untuk menghitung potensi dampak lingkungan dari masing-masing skenario *co-firing* biomassa.

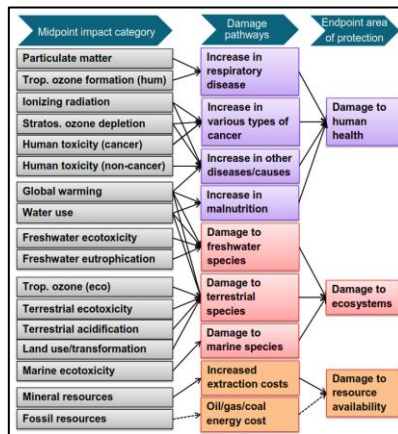
Tabel 2. Parameter operasional PLTU Pelabuhan Ratu[15]

Uraian	Unit	S1	S2	S3	S4	S5	S6
Input							
Batubara LRC	kg	0,65	0,26	0,19	0,23	0,16	0,08

Uraian	Unit	S1	S2	S3	S4	S5	S6
Batubara MRC	kg	0	0,39	0,45	0,39	0,43	0,48
Sawdust	kg	0	0	0	0,03	0,07	0,1
Air Laut	kg	189	189	189	189	189	189
Air Demin	kg	3,58	3,58	3,58	3,58	3,58	3,58
Udara Pembakaran	kg	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5
Listrik	kwh	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
Steam	MJ	11,4	11,4	11,4	11,4	11,4	11,4
Output							
Ash	kg	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Listrik	kwh	1	1	1	1	1	1

Impact Assessment

Pada penelitian ini *Impact assessment* menggunakan metode ReCiPe2016. Metode penilaian dampak daur hidup LCIA yang mengharmonisasi model dampak pada level *midpoint* dan *endpoint*. Tujuan utama ReCiPe adalah mengubah data *Life Cycle Inventory* (LCI) menjadi sejumlah indikator dampak lingkungan terstandar yang dapat digunakan untuk pengambilan Keputusan. Dalam studi perbandingan dampak lingkungan dari variasi komposisi bahan bakar PLTU (misalnya campuran LRC, MRC, dan *sawdust*), metode ReCiPe2016 sangat relevan Mengukur kategori dampak spesifik seperti *Climate Change, Fine Particulate Matter Formation, Freshwater Eutrophication Human Toxicity & Ecotoxicity* [11].



Gambar 2. Cakupan kategori dampak pada metodologi ReCipe2016[11]

Gambar 2 merupakan diagram alur yang mengelompokkan 17 kategori dampak pada level midpoint dan menghubungkannya dengan tiga kategori utama pada level *endpoint*, yaitu *Human Health* (Kesehatan Manusia), *Ecosystems* (Kualitas Ekosistem), dan *Resource Availability* (Kelangkaan Sumber Daya). Pada level *midpoint*, setiap kategori dampak merepresentasikan mekanisme dampak lingkungan yang lebih spesifik, seperti *global warming, fine particulate matter formation, freshwater eutrophication, human toxicity, dan fossil resource scarcity*. Dalam metode ReCiPe2016, pendekatan midpoint digunakan untuk memberikan informasi yang lebih rinci mengenai sumber penyebab dampak lingkungan, sedangkan pendekatan endpoint digunakan untuk menunjukkan konsekuensi akhir dari dampak tersebut secara lebih sederhana dan mudah diinterpretasikan.

Hasil Dan Pembahasan

Berdasarkan data *input output* dan data emisi yang dihasilkan dari semua proses, maka dapat dilakukan tahapan *impact assessment* menggunakan software Simapro 9 dengan *Characterisation* menggunakan Recipe2016(E) dengan hasil untuk analisa *endpoint* dan *midpoint* sebagai berikut.

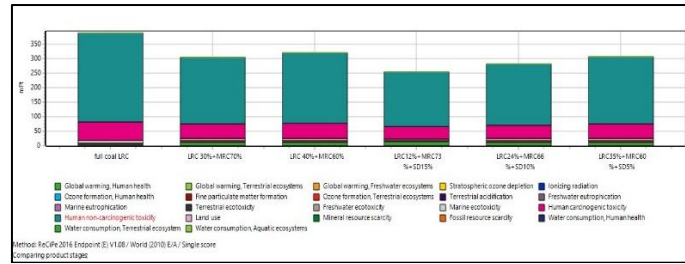
Tabel 3. Recipe 2016 Endpoint (E) Impact Assessment (Characterisation)

Impact category	Unit	S1	S2	S3	S4	S5	S6
Global warming, Human health	DALY	1.02E-01	2.90E-01	2.94E-02	2.90E-01	2.92E-01	2.94E-01
Global warming, Terrestrial ecosystems	species.yr	2.03E-05	5.80E-04	5.87E-04	5.80E-04	5.85E-04	5.89E-04
Global warming, Marine ecosystems	species.yr	5.54E-09	1.58E-08	1.60E-08	1.58E-08	1.59E-09	1.61E-08

Impact category	Unit	S1	S2	S3	S4	S5	S6
Freshwater ecosystems							
Stratospheric ozone depletion	DALY	4.10E-06	6.21E-06	6.51E-06	6.22E-07	6.43E-06	6.63E-07
Ionizing radiation	DALY	2.19E-06	1.84E-06	1.76E-06	1.79E-06	1.68E-08	1.57E-06
Ozone formation, Human health	DALY	2.19E-06	3.92E-06	4.09E-05	3.92E-05	4.05E-05	4.17E-05
Fine particulate matter formation	DALY	1.04E-01	1.41E-01	1.43E-01	1.41E-01	1.42E-01	1.44E-01
Ozone formation, Terrestrial ecosystems	species.yr	3.15E-06	5.64E-06	5.89E-06	5.65E-06	5.82E-06	6.00E-07
Terrestrial acidification	species.yr	5.94E-06	3.47E-05	3.50E-05	3.47E-06	3.49E-06	3.51E-05
Freshwater eutrophication	species.yr	1.09E-04	7.75E-05	7.12E-05	7.32E-05	6.49E-05	5.64E-06
Marine eutrophication	species.yr	1.69E-08	1.21E-09	1.11E-08	1.14E-08	1.01E-08	8.80E-09
Terrestrial ecotoxicity	species.yr	9.16E-08	1.73E-07	1.85E-07	1.74E-07	1.82E-07	1.89E-08
Freshwater ecotoxicity	species.yr	2.59E-06	2.03E-06	1.91E-06	1.93E-06	1.76E-06	1.58E-06
Marine ecotoxicity	species.yr	4.22E-04	3.34E-04	3.15E-04	3.18E-04	2.90E-04	2.61E-04
Human carcinogenic toxicity	DALY	1.68E+00	1.37E+00	1.30E+00	1.30E+00	1.20E+00	1.09E+00
Human non-carcinogenic toxicity	DALY	8.00E+00	6.35E+00	5.98E+00	6.04E+00	5.50E+00	4.95E+00
Land use	species.yr	8.71E-07	1.01E-05	1.14E-05	1.43E-05	1.93E-05	2.44E-05
Mineral resource scarcity	USD2013	1.35E+00	2.52E+00	2.68E-01	2.52E-01	2.63E+00	2.74E+00
Fossil resource scarcity	USD2013	0,0267392	0,0297643	0,0298192	0,0289024	0,0281156	0,0272944
Water consumption, Human health	DALY	1.20E-04	1.18E-05	1.16E-04	1.15E-04	1.11E-04	1.06E-04
Water consumption, Terrestrial ecosystem	species.yr	7.47E-07	7.39E-07	7.29E-07	7.19E-08	6.95E-07	6.69E-07
Water consumption, Aquatic ecosystems	species.yr	4.76E-11	4.74E-11	4.68E-12	4.63E-11	4.49E-11	4.34E-11

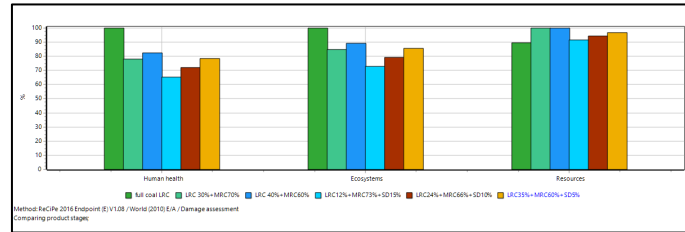
Dari Table 3 diketahui penambahan *sawdust* dalam campuran bahan bakar pembangkit listrik secara signifikan menurunkan dampak terhadap kesehatan manusia, kerusakan ekosistem, dan konsumsi sumber daya. Skenario 6 (LRC 12% + MRC 73% + SD15%) adalah dampak yang paling rendah secara keseluruhan. Dengan demikian, pendekatan *co-firing* biomass tidak hanya mengurangi emisi tertentu, tetapi juga memberikan manfaat signifikan pada level endpoint yang berpengaruh langsung terhadap manusia, sumber daya alam, dan ekonomi.

Distribusi dampak lingkungan berdasarkan kategori *midpoint* dari berbagai skenario campuran bahan bakar yang terlihat pada grafik Gambar 3. terlihat bahwa skenario bahan bakar batubara 100% LRC menghasilkan total dampak paling tinggi, didominasi oleh *global warming (human health)* dan *mineral resource scarcity* sebagai kontributor utama. Ketika proporsi *sawdust* ditambahkan, terutama pada skenario 6 (LRC 12% + MRC 73% + SD 15%), terjadi penurunan signifikan hampir di semua kategori, termasuk *toxicities (human non-carcinogenic dan ecotoxicities)*, *water consumption*, dan *ozone formation*. Meskipun beberapa kategori seperti *terrestrial acidification* dan *freshwater ecotoxicity* masih muncul, kontribusinya lebih kecil dibanding skenario awal. Hal ini menegaskan bahwa *co-firing* dengan biomassa *sawdust* secara konsisten mengurangi dampak lingkungan pada hampir seluruh aspek dampak, dan skenario dengan proporsi *sawdust* tertinggi *sawdust* 15% merupakan opsi paling ramah lingkungan dalam konteks *multi-impact*.



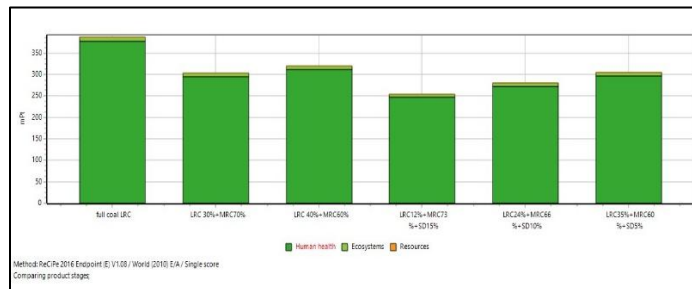
Gambar 3. Grafik Midpoint Impact Assessment Result (Single Score)

Hasil analisa *endpoint* yang terlihat pada Gambar 4 menunjukkan bahwa penambahan *sawdust* dalam campuran bahan bakar pembangkit listrik secara umum memberikan dampak positif terhadap lingkungan. Dampak pemanasan global terhadap kesehatan manusia dan ekosistem menurun signifikan, begitu pula dengan potensi eutrofikasi, konsumsi air, dan kelangkaan sumber daya fosil dan mineral. Penggunaan *sawdust* juga membantu menekan toksisitas terhadap ekosistem perairan dan daratan. Namun demikian, beberapa indikator seperti toksisitas terhadap manusia (*non-karsinogenik*) dan pembentukan partikulat halus serta ozon menunjukkan kecenderungan meningkat atau fluktuatif, yang kemungkinan disebabkan oleh pembakaran biomassa yang belum sepenuhnya optimal. Peningkatan tersebut kemungkinan dipengaruhi oleh karakteristik biomassa *sawdust* yang memiliki kandungan *volatile matter* lebih tinggi dibandingkan batubara. Selain itu, kadar air biomassa yang relatif lebih tinggi dibandingkan batubara juga berpotensi mempengaruhi kestabilan pembakaran dan meningkatkan emisi partikulat pada kondisi tertentu. Secara keseluruhan, *sawdust* dapat mengurangi sebagian besar dampak lingkungan, namun tetap perlu pengelolaan emisi dan proses pembakaran yang lebih efisien untuk meminimalkan dampak negatif yang masih tersisa.



Gambar 4. Grafik Endpoint Impact Assessment Result (Damage Assessment)

Impact Assesment Single Score Endpoint yang dilakukan terlihat pada Gambar 5 menunjukkan bahwa skenario penggunaan bahan bakar batubara LRC 100% memiliki dampak lingkungan tertinggi, terutama terhadap kesehatan manusia. Dampak tersebut menurun secara signifikan ketika dilakukan *co-firing* dengan batubara berkalori sedang (MRC) dan biomassa (*sawdust*), dengan skenario terbaik ditunjukkan oleh campuran skenario 6 (LRC 12%, MRC 73%, dan SD 15%) yang menghasilkan skor total terendah. Dominasi kontribusi terhadap kerusakan berasal dari kategori human health, sementara kategori *ecosystems* dan *resources* memberikan kontribusi yang jauh lebih kecil namun tetap menunjukkan tren penurunan. Secara keseluruhan, penambahan proporsi biomassa terbukti efektif menurunkan beban lingkungan, memperkuat argumen bahwa transisi menuju energi yang lebih bersih melalui *co-firing* dapat menjadi solusi strategis dalam mengurangi dampak negatif terhadap kesehatan dan lingkungan.



Gambar 5. Diagram Impact Assesment Singel Score Endpoint

Simplan

Berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan, penerapan teknologi *co-firing* menggunakan biomassa jenis *sawdust* sebagai campuran bahan bakar di PLTU Pelabuhan Ratu mampu menurunkan dampak lingkungan secara signifikan dibandingkan penggunaan bahan bakar batubara saja. Dengan menggunakan pendekatan *Life Cycle Assessment (LCA)*

berbasis metode ReCiPe2016, dilakukan evaluasi terhadap enam skenario variasi porsi bahan bakar untuk mengetahui pengaruhnya terhadap kesehatan manusia, kualitas ekosistem, dan kelangkaan sumber daya. Hasil analisis *endpoint* menunjukkan bahwa skenario dengan porsi bahan bakar skenario 6 (LRC 12%, MRC 73%, dan sawdust 15%) merupakan skenario dengan dampak lingkungan paling minim dibandingkan skenario lainnya. Pada skenario tersebut terjadi penurunan dampak terhadap kesehatan manusia sebesar 34,5%, penurunan dampak terhadap kualitas ekosistem sebesar 27,0%, serta penurunan konsumsi sumber daya sebesar 2,43% dibandingkan skenario penggunaan 100% batubara *Low Rank Coal* (LRC). Hasil tersebut menunjukkan bahwa peningkatan porsi biomassa dalam campuran bahan bakar berkontribusi positif terhadap penurunan dampak lingkungan secara keseluruhan.

Berdasarkan hasil analisis midpoint, penambahan porsi *sawdust* juga berkontribusi terhadap penurunan beberapa kategori dampak lingkungan seperti *global warming potential*, *freshwater eutrophication*, *fossil resource scarcity*, dan *water consumption*. Namun demikian, ditemukan peningkatan pada beberapa kategori dampak seperti *fine particulate matter formation* dan *human non-carcinogenic toxicity*, yang diduga dipengaruhi oleh karakteristik pembakaran biomassa yang belum optimal. Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa implementasi *co-firing* biomassa berpotensi menjadi strategi yang efektif dalam mendukung dekarbonisasi sektor pembangkitan listrik, khususnya pada PLTU berbahan bakar batubara, dengan tetap mempertimbangkan optimalisasi proses pembakaran untuk meminimalkan dampak lingkungan yang muncul.

Daftar Pustaka

- [1] PT PLN (Persero), “Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik 2025-2034,” *PT. Perusah. List. Negara*, pp. 2019–2028, 2025.
- [2] D. Putri Lubis and K. Umma Tambunan, “Variasi Rasio Co-Firing Batubara Dan Sawdust (Serbuk Gergaji) Terhadap Pembangkit Listrik Tenaga Uap,” *SINERGI Polmed J. Ilm. Tek. MESIN*, vol. 06, no. 01, pp. 28–36, 2025, [Online]. Available: <http://ojs.polmed.ac.id/index.php/Sinergi/index>
- [3] I. H. Mohamed, A. H. Hossieny, O. O. Abo Akrb, and M. N. Abdelmoez, “Energy Efficiency and Environmental Impact Assessment of Steam Power Plant Boiler,” *Assiut Univ. Bull. Environ. Res.*, vol. 0, no. 0, pp. 0–0, 2024, doi: 10.21608/auber.2024.290268.1086.
- [4] K. Hasan, “Manfaat Kesehatan dan Ekonomi dari Pensiun Dini Pembangkit Listrik Batubara di Bawah JETP Indonesia,” *CREA*, 2024.
- [5] M. Triani, D. D. Anggoro, and V. D. Yuniarto, “Potensi Dekarbonisasi Pembangkit Listrik Batubara Melalui Cofiring Biomassa Dan Carbon Capture Utilization,” *Metana*, vol. 20, no. 1, pp. 57–68, 2024, doi: 10.14710/metana.v20i1.63102.
- [6] S. Algarni, V. Tirth, T. Alqahtani, S. Alshehery, and P. Kshirsagar, “Contribution of renewable energy sources to the environmental impacts and economic benefits for sustainable development,” *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 56, no. December 2022, p. 103098, 2023, doi: 10.1016/j.seta.2023.103098.
- [7] D. T. Nugraheni, R. Purwana, and U. S. Hamzah, “Environmental Impact Assessment of Co-firing Implementation at X Steam Power Plant, West Java,” *J. Presipitasi Media Komun. dan Pengemb. Tek. Lingkung.*, vol. 20, no. 2, pp. 334–344, 2023, doi: 10.14710/presipitasi.v20i2.334-344.
- [8] R. K. Nasution, S. R. Haq, and T. A. Cahyadi, “Literature Review,” vol. 12, pp. 173–183, 2024.
- [9] N. Cahyo, H. Alif, H. Saksono, and P. Paryanto, *Performance and Emission Characteristic of Co-firing of Wood Pellets with sub-Bituminous Coal in a 330 MWe Pulverized Coal Boiler*. 2020. doi: 10.1109/ICT-PEP50916.2020.9249930.
- [10] M. Huijbregts *et al.*, “ReCiPe 2016,” *Natl. Inst. Public Heal. Environ.*, p. 194, 2016, [Online]. Available: <https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/2016-0104.pdf>
- [11] M. A. J. Huijbregts *et al.*, “ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level,” *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 22, no. 2, pp. 138–147, 2017, doi: 10.1007/s11367-016-1246-y.
- [12] M. F. Ilham and S. W. A. Suedy, “Effect of Cofiring Using Sawdust on Steam Coal Power Plant Heat Rate Value,” *J. Energi Baru dan Terbarukan*, vol. 3, no. 2, pp. 121–127, 2022, doi: 10.14710/jebt.2022.13828.
- [13] ISO 14040, *Environmental Management-Life Cycle Assessment-Principles and Framework*. 2016.
- [14] ISO 14044, “Environmental Management-Life Cycle Assessment-Requirements and Guidelines,” *Int. Organ. Stand.*, 2017.
- [15] PLN Indonesia Power UBP Pelabuhan Ratu, “Laporan Operasi PLN Indonesia Power UBP Pelabuhan Ratu,” 2025.