

Operational and Environmental Optimization through Lean and Life Cycle Assessment in a Coal-Fired Power Plant

[Optimasi Operasional dan Lingkungan melalui Lean dan Life Cycle Assesment di Pembangkit Listrik Tenaga Batubara]

Maftukhin¹⁾, Rita Ambarwati ^{*,2)}

¹⁾ Program Studi Magister Manajemen, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

²⁾ Program Studi Magister Manajemen, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

^{*}Email Penulis Korespondensi: ritaambarwati@umsida.ac.id

Abstract. This study highlights the critical need for energy efficiency improvements and environmental impact reduction in coal-fired power plants. The main objective is to evaluate the integration of Lean Thinking and Life Cycle Assessment (LCA) methods to optimize operational performance and sustainability in a 25 MW coal-fired power plant in Indonesia. With a quantitative research design, the study analyzes auxiliary power consumption, boiler combustion efficiency, and emissions before and after Lean-based interventions, supported by LCA impact assessment using Open LCA software and TRACI method. The results show a decrease in auxiliary power consumption from 14.75% to 11.75% of total production, an increase in steam production by 3.75% per ton of coal, a decrease in coal consumption per kWh by 3.48%, and a reduction in Global Warming Potential by 10.12%. Discussion highlights the synergy between operational efficiency and environmental benefits, while acknowledging the trade-offs of small increases in acidification and particulate emissions. This study enriches insights by empirically linking Lean operational improvements to environmental impact reduction, and provides a practical framework for sustainable energy generation. These findings confirm that an integrative Lean-LCA approach is essential to balance economic and ecological objectives in fossil fuel power plants.

Keywords - Lean Thinking; Life Cycle Assessment; Energy efficiency; Coal-fired power plants; Environmental Impact

Abstrak. Studi ini menyoroti kebutuhan kritis untuk peningkatan efisiensi energi dan pengurangan dampak lingkungan pada pembangkit listrik tenaga batu bara. Tujuan utamanya adalah untuk mengevaluasi integrasi metode Lean Thinking dan Life Cycle Assessment (LCA) untuk mengoptimalkan kinerja operasional dan keberlanjutan di pembangkit listrik tenaga batu bara 25 MW di Indonesia. Dengan desain penelitian kuantitatif, studi ini menganalisis konsumsi daya tambahan, efisiensi pembakaran boiler, dan emisi sebelum dan sesudah intervensi berbasis Lean, didukung oleh penilaian dampak LCA menggunakan perangkat lunak Open LCA dan metode TRACI. Hasilnya menunjukkan penurunan konsumsi daya tambahan dari 14,75% menjadi 11,75% dari total produksi, peningkatan produksi uap sebesar 3,75% per ton batu bara, penurunan konsumsi batu bara per kWh sebesar 3,48%, dan pengurangan Potensi Pemanasan Global sebesar 10.12%. Diskusi menyoroti sinergi antara efisiensi operasional dan manfaat lingkungan, sambil mengakui trade-off dari peningkatan kecil dalam pengasaman dan emisi partikulat. Studi ini memperkaya wawasan dengan menghubungkan secara empiris peningkatan operasional Lean dengan pengurangan dampak lingkungan, dan menyediakan kerangka kerja praktis untuk pembangkitan energi berkelanjutan. Temuan ini menegaskan bahwa pendekatan Lean-LCA integratif sangat penting untuk menyeimbangkan tujuan ekonomi dan ekologis dalam pembangkit listrik berbahan bakar fosil.

Kata Kunci - Lean Thinking; Penilaian Siklus Hidup; Efisiensi Energi; Pembangkit Listrik Tenaga Batubara; Dampak Lingkungan

I. PENDAHULUAN

Lanskap energi global sedang mengalami transformasi yang signifikan karena meningkatnya permintaan, masalah lingkungan, dan faktor geopolitik yang memengaruhi harga komoditas energi. Pembangkit listrik tenaga batu bara, yang masih menjadi sumber utama pembangkit listrik di banyak negara termasuk Indonesia, menghadapi tekanan yang semakin besar untuk meningkatkan efisiensi operasional dan mengurangi dampak lingkungan[1], [2]. Meningkatnya harga batu bara yang dipicu oleh ketegangan geopolitik seperti konflik Rusia-Ukraina telah memperkuat kebutuhan pembangkit listrik tenaga batu bara untuk mengoptimalkan konsumsi energi guna mempertahankan kelangsungan ekonomi dan keunggulan operasional[3], [4] Peningkatan efisiensi pada pembangkit listrik tidak hanya mengurangi biaya operasional tetapi juga mengurangi ketergantungan pada pasokan energi eksternal, sehingga meningkatkan ketahanan dan stabilitas sistem[5], [6].

Efisiensi operasional pada pembangkit listrik tenaga batu bara berkaitan erat dengan upaya untuk meminimalkan kehilangan energi dan memaksimalkan konversi energi batu bara menjadi uap dan listrik yang dapat digunakan. Inefisiensi sering terjadi karena operasi manual atau ketinggalan zaman yang menyebabkan kehilangan panas yang berlebihan dan konsumsi daya bantu yang tidak optimal, yang dapat diukur melalui metrik seperti konsumsi energi spesifik (SEC) dan efisiensi termal [7], [8], [9]. Mengurangi panas buang dan mengoptimalkan penggunaan peralatan bantu sangat penting untuk mencapai efektivitas peralatan yang tinggi secara keseluruhan, yang secara langsung meningkatkan daya saing pembangkit listrik di tengah meningkatnya kompleksitas pasar energi global [7], [10], [11].

Meskipun pendekatan untuk peningkatan operasional sudah ada, tantangan utama tetap ada dalam mengintegrasikan efisiensi energi secara sistematis dengan penilaian dampak lingkungan untuk mendukung keberlanjutan *Lean Thinking*, sebuah metodologi yang awalnya dikembangkan untuk manufaktur guna mengurangi limbah dan mengoptimalkan aliran proses, telah membuktikan potensinya dalam meningkatkan efisiensi operasional dengan mengidentifikasi dan menghilangkan aktivitas yang tidak bernilai tambah, termasuk pemborosan energi [12]. Sementara itu, *Life Cycle Assessment* (LCA) menyediakan kerangka kerja yang komprehensif untuk mengevaluasi dampak lingkungan di seluruh siklus hidup suatu produk atau sistem, mulai dari ekstraksi bahan baku, produksi, operasi, hingga pembuangan akhir [13], [14].

Mengintegrasikan *Lean Thinking* dengan LCA dalam konteks pembangkit listrik tenaga batu bara dapat memberikan pendekatan holistik yang tidak hanya mengoptimalkan efisiensi energi tetapi juga mengurangi dampak lingkungan seperti emisi gas rumah kaca dan polutan udara. Integrasi ini menghubungkan peningkatan operasional dengan tujuan keberlanjutan, memberikan para pengambil keputusan wawasan yang kuat tentang bagaimana optimalisasi proses memengaruhi kinerja lingkungan di seluruh siklus hidup pembangkit listrik [15], [16], [17]. Namun, penelitian yang berfokus pada strategi integratif ini, terutama dalam mengoptimalkan konsumsi daya tambahan (kWh aux) dan efisiensi pembakaran boiler, masih sangat terbatas.

Penelitian sebelumnya telah mengeksplorasi berbagai aspek implementasi *Lean* di pembangkit listrik, mulai dari model identifikasi limbah hingga penggunaan alat khusus seperti *Value Stream Mapping* (VSM) untuk meningkatkan pemeliharaan dan ketersediaan operasional [18], [19], [20]. Penelitian lain berfokus pada penerapan LCA untuk mengukur dampak lingkungan dari pembangkit listrik tenaga batu bara, termasuk analisis emisi CO₂, CH₄, N₂O, dan potensi teknologi seperti Carbon Capture and Storage (CCS) untuk memitigasi emisi [21], [22], [23]. Meskipun penelitian-penelitian ini telah memberikan kontribusi penting, terdapat kesenjangan penelitian mengenai penerapan gabungan metode *Lean* dan LCA untuk secara holistik mengatasi efisiensi energi dan keberlanjutan lingkungan pada pembangkit listrik berbahan bakar batu bara.

Studi ini bertujuan untuk mengisi kesenjangan ini dengan mengembangkan model terintegrasi *Lean Thinking* dan Penilaian Siklus Hidup yang dirancang khusus untuk pembangkit listrik tenaga batu bara. Model ini diharapkan dapat mengidentifikasi pemborosan energi, mengoptimalkan konsumsi daya tambahan, dan meningkatkan efisiensi pembakaran boiler sekaligus mengevaluasi dampak lingkungan berupa pengurangan emisi. Model ini diharapkan dapat mengidentifikasi pemborosan energi, mengoptimalkan konsumsi daya tambahan, dan meningkatkan efisiensi pembakaran boiler sekaligus mengevaluasi dampak lingkungan berupa pengurangan emisi. Model ini diharapkan dapat mengidentifikasi pemborosan energi, mengoptimalkan konsumsi daya tambahan, dan meningkatkan efisiensi pembakaran boiler sekaligus mengevaluasi dampak lingkungan berupa pengurangan emisi.

Singkatnya, integrasi *Lean Thinking* dan LCA menawarkan jalur yang menjanjikan untuk meningkatkan efisiensi energi dan kinerja lingkungan pembangkit listrik tenaga batu bara. Kebaruan studi ini terletak pada penerapan kerangka kerja gabungan tersebut pada kondisi operasional pembangkit listrik tenaga batu bara di dunia nyata, sehingga memperluas pengetahuan yang ada dan menyediakan model yang dapat direplikasi bagi industri pembangkit listrik yang berupaya mencapai keberlanjutan di tengah dinamika energi global yang terus berkembang.

Penelitian tentang peningkatan efisiensi energi dan pengurangan dampak lingkungan pada pembangkit listrik tenaga batu bara (PLTU) telah mendapat perhatian luas dalam beberapa dekade terakhir [24], [25]. Pendekatan *Lean Thinking* dan *Life Cycle Assessment* (LCA) merupakan dua metode yang sering digunakan secara terpisah maupun terintegrasi untuk mengoptimalkan kinerja operasional dan keberlanjutan lingkungan di sektor energi.

Beberapa studi sebelumnya telah mengkaji penerapan *Lean Thinking* di PLTU, dengan fokus utama pada pengurangan pemborosan energi, peningkatan ketersediaan peralatan, dan optimalisasi proses pemeliharaan. Tabel 1 dalam studi ini memberikan perbandingan komprehensif dari studi-studi sebelumnya, yang menyoroti temuan-temuan kunci dan kesenjangan penelitian. Sebuah model multi-aspek dikembangkan untuk mengidentifikasi sumber pemborosan di pembangkit listrik termal dan untuk memilih praktik *Lean Manufacturing* yang paling tepat guna meningkatkan produktivitas [18]. *Value Stream Mapping* diterapkan untuk mengurangi waktu terbuang dalam pemeliharaan unit penanganan batubara, sehingga menghasilkan peningkatan ketersediaan dan keandalan pembangkit listrik [19]. *Value Stream Mapping* diterapkan untuk mengurangi waktu terbuang dalam pemeliharaan unit penanganan batubara, sehingga menghasilkan peningkatan ketersediaan dan keandalan pembangkit listrik [19].

Sementara itu, penelitian terkait LCA pada pembangkit listrik tenaga batu bara menekankan pentingnya analisis siklus hidup untuk mengukur emisi gas rumah kaca, polutan udara, dan dampak lingkungan lainnya. Potensi teknologi

Carbon Capture and Storage (CCS) dinilai menggunakan *Life Cycle Assessment* (LCA), yang menunjukkan pengurangan signifikan dalam emisi CO₂ dan polutan lainnya [22]. Perangkat lunak SimaPro digunakan untuk mengidentifikasi dan mengukur emisi CO₂, CH₄, dan N₂O dari kegiatan produksi pembangkit listrik tenaga batu bara di Jawa Timur [23]

Meskipun studi-studi ini telah memberikan kontribusi penting, terdapat beberapa kelemahan dan kesenjangan yang perlu diatasi. Sebagian besar studi Lean masih terbatas pada aspek operasional seperti ketersediaan dan waktu pemeliharaan, tanpa mengintegrasikan analisis dampak lingkungan yang komprehensif. Sebagian besar studi Lean masih terbatas pada aspek operasional seperti ketersediaan dan waktu pemeliharaan, tanpa mengintegrasikan analisis dampak lingkungan yang komprehensif. Sebaliknya, banyak studi LCA berfokus pada evaluasi dampak lingkungan tanpa mengeksplorasi secara mendalam dampak perbaikan proses operasional melalui Lean.

Tabel 1. Perbandingan Studi Sebelumnya

Penulis & Tahun	Tujuan Penelitian	Metodologi	Temuan Utama	Gap Penelitian
Hussain et al., 2020 [18]	Mengembangkan identifikasi multi aspek dan rencana perbaikan di PLTU dengan <i>Lean Manufacturing</i>	Kualitatif, Kuantitatif, AHP	Identifikasi Limbah yang akurat dan rencana perbaikan lean manufacturing yang efektif	Fokus pada aspek operasional tanpa integrasi LCA
Chinhengo et al., 2020 [19]	Menggunakan VSM untuk mengurangi waktu terbuang dalam pemeliharaan di unit handling	<i>Value Stream Mapping</i> (VSM)	Pengurangan waktu terbuang sebesar 6.5%, peningkatan waktu <i>availability</i> 0.158%	Tidak ada Penilaian dampak lingkungan
Devi & Putu, 2020 [20]	Meningkatkan EAF PLTU menggunakan <i>Lean Thinking</i> , VSM, 5S, and LCA	<i>Lean Thinking</i> , LCA	AF meningkat dari 90.21% menjadi 90.84%, dengan rekomendasi <i>environmental impact</i>	Fokus pada <i>overhaul</i> , tidak ada detail optimasi kWh aux dan boiler
Salah & Mustafa, 2020 [21]	Mengurangi SEC di industry makanan dengan Lean Production	<i>Lean Production</i>	Penurunan SEC sebesar 15.1%	Industri makanan, bukan PLTU
Muhammad & Farzaneh, 2023 [22]	Menilai dampak lingkungan teknologi CCS-CCU di PLTU	LCA	Potensi pengurangan emisi CO ₂ sebesar 28%	Fokus pada teknologi CCS-CCU, tanpa integrasi Lean
Wibawa et al., 2020 [23]	Menilai dampak lingkungan dari produksi PLTU	LCA dengan SimaPro	Emisi CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O per kWh listrik.	Penilaian Lingkungan tanpa pendekatan lean

Integrasi keduanya masih sangat terbatas, terutama terkait energi dan efisiensi pembakaran boiler yang secara langsung memengaruhi emisi. Variabilitas kualitas batubara dan fluktuasi operasional juga belum dibahas secara holistik dalam literatur saat ini, keduanya masih sangat terbatas, terutama terkait efisiensi energi, terutama konsumsi listrik tambahan.

Studi ini mengisi celah tersebut dengan mengembangkan model *Lean Thinking* dan LCA terintegrasi yang menggabungkan optimasi energi operasional dengan evaluasi dampak lingkungan yang komprehensif. Pendekatan ini diharapkan dapat memberikan solusi praktis dan aplikatif yang belum banyak ditemukan dalam studi sebelumnya, terutama dalam konteks pembangkit listrik tenaga batubara di Indonesia

Dengan demikian, penelitian ini memperkuat literatur dengan menyajikan model yang menggabungkan efisiensi operasional Lean dengan penilaian siklus hidup lingkungan, sekaligus menjawab tantangan nyata dalam pengelolaan energi dan lingkungan di pembangkit listrik tenaga batu bara modern.

II. METODE

Penelitian ini menggunakan desain penelitian kuantitatif yang mengintegrasikan prinsip-prinsip *Lean Thinking* dengan metodologi *Life Cycle Assessment* (LCA) untuk mengkaji peningkatan efisiensi energi dan mitigasi dampak lingkungan pada pembangkit listrik tenaga batu bara. Studi kasus ini berfokus pada pembangkit listrik 25 MW milik

PT XYZ yang berlokasi di Gresik, Jawa Timur, Indonesia, yang memasok uap dan listrik ke operasi manufaktur kertas. Metodologi ini disusun secara sistematis untuk mengumpulkan, menganalisis, dan menginterpretasikan data operasional dan lingkungan sebelum dan sesudah implementasi Lean, dan menggunakan LCA untuk menilai jejak lingkungan siklus hidup yang terkait dengan perubahan operasional ini [12], [13], [23].

2.1 Desain dan Pendekatan Penelitian

Studi ini menggunakan pendekatan studi kasus kuantitatif untuk mengukur dampak intervensi Lean Thinking terhadap konsumsi energi spesifik (kWh tambahan) dan efisiensi pembakaran boiler serta dampaknya terhadap emisi. Lean Thinking diterapkan untuk mengidentifikasi dan menghilangkan pemborosan energi pada sistem tambahan dan operasi boiler pembangkit listrik, dengan tujuan meningkatkan efisiensi operasional secara keseluruhan. Secara bersamaan, LCA digunakan untuk mengevaluasi konsekuensi lingkungan dari perubahan operasional ini dari perspektif siklus hidup, mengikuti standar internasional ISO 14040 dan ISO 14044, [10], [26], [27]. Pendekatan terpadu ini memastikan bahwa peningkatan operasional dinilai tidak hanya berdasarkan metrik kinerja tetapi juga kriteria keberlanjutan.

2.2 Pengumpulan Data

Data operasional dikumpulkan selama empat tahun yang mencakup tiga fase berbeda: sebelum implementasi Lean (Juni 2021 – Mei 2022), implementasi dan optimasi Lean (Januari 2024 – Desember 2024), dan fase transisi di mana penyesuaian operasional dilakukan (Juni 2022 – Desember 2023). Data yang dikumpulkan meliputi konsumsi energi listrik untuk peralatan bantu (kWh aux), konsumsi bahan bakar boiler, parameter kualitas batubara, produksi uap, dan output listrik. Secara spesifik, konsumsi daya bantu meliputi peralatan seperti unit penanganan batubara, kipas boiler, pompa air umpan, dan motor pengolah air yang merupakan kontributor utama konsumsi energi pembangkit listrik. Data analisis proksimat dan ultimat batubara digunakan untuk mengkarakterisasi kualitas bahan bakar dan mendukung perhitungan optimasi pembakaran [9], [11], [15], [28].

2.3 Implementasi Lean Thinking

Prinsip Lean Thinking digunakan untuk mengidentifikasi sumber pemborosan energi pada sistem pembangkit listrik tambahan dan proses pembakaran boiler. Salah satu intervensi utama adalah pemasangan penggerak frekuensi variabel (inverter) pada motor dan pompa untuk mengatur kecepatan sesuai kebutuhan operasional secara real-time, menggantikan kontrol kecepatan tetap menggunakan katup dan peredam.

Pendekatan ini bertujuan untuk mengurangi konsumsi energi berlebih tanpa mengorbankan kinerja atau keandalan sistem. Upaya eliminasi pemborosan difokuskan pada meminimalkan penggunaan energi yang tidak memberikan nilai tambah, mengoptimalkan alur proses, dan meningkatkan ketersediaan serta keandalan peralatan [12], [18], [19]. Dampak intervensi Lean dipantau melalui pengukuran berkelanjutan terhadap konsumsi daya tambahan dan parameter efisiensi boiler.

2.4 Kerangka Kerja Penilaian Siklus Hidup (LCA)

LCA dilakukan untuk mengukur dampak lingkungan yang terkait dengan aktivitas operasional pembangkit listrik sebelum dan sesudah penerapan penilaian. Penilaian ini mengikuti standar ISO 14040 dan ISO 14044 yang terdiri dari empat tahap: penentuan tujuan dan ruang lingkup, inventarisasi siklus hidup (LCI), penilaian dampak siklus hidup (LCIA), dan interpretasi [10], [27], [29], [30].

- Penentuan Tujuan dan Ruang Lingkup: LCA bertujuan untuk mengevaluasi manfaat lingkungan dari peningkatan efisiensi berbasis Lean, dengan fokus pada pengurangan konsumsi bahan bakar dan emisi selama produksi listrik dan uap. Batasan sistem meliputi penanganan batubara, pembakaran boiler, pengoperasian turbin, dan proses pembangkitan listrik. Satuan fungsional didefinisikan per kilowatt-jam (kWh) listrik yang dihasilkan.
- Inventarisasi Daur Hidup: Data input-output dikumpulkan untuk semua aliran yang relevan, termasuk konsumsi batubara, konsumsi daya tambahan, emisi udara (CO₂, CH₄, N₂O, SO_x, NO_x), dan limbah. Sumber data berasal dari laporan teknis operasional PT XYZ dan analisis laboratorium batubara.
- Penilaian Dampak Siklus Hidup: LCIA menggunakan perangkat lunak OpenLCA dengan metode US EPA TRACI 2.1 untuk mengkuantifikasi kategori dampak seperti Potensi Pemanasan Global (GWP), Potensi Pengasaman, dan Dampak Kesehatan Manusia (Partikulat).
- Interpretasi: Hasil dianalisis untuk mengidentifikasi kontributor utama terhadap beban lingkungan dan merekomendasikan perbaikan operasional untuk memaksimalkan efisiensi energi dan manfaat lingkungan.

2.5 Prosedur Analisis Data

Analisis data melibatkan evaluasi komparatif konsumsi energi dan emisi sebelum dan sesudah implementasi Lean. Konsumsi daya tambahan dihitung sebagai persentase dari total keluaran listrik untuk menilai peningkatan

efisiensi.. Efisiensi boiler diukur berdasarkan produksi uap per unit batubara dan tingkat pemanfaatan bahan bakar. Perhitungan emisi diturunkan dari data konsumsi bahan bakar dan stoikiometri pembakaran, yang disesuaikan dengan asupan udara berlebih. Hasil LCA diinterpretasikan dalam konteks metrik kinerja operasional untuk memberikan penilaian komprehensif terhadap peningkatan keberlanjutan.

2.6 Alat dan Perangkat Lunak

Penelitian ini menggunakan Open LCA versi 2.4 untuk pemodelan siklus hidup dan penilaian dampak lingkungan. TRACI 2.1 digunakan untuk memperkirakan kategori dampak lingkungan yang relevan dengan proses pembakaran batu bara..Alat analisis statistik mendukung validasi data dan analisis tren perubahan konsumsi energi dan emisi selama periode penelitian[23], [31], [32].

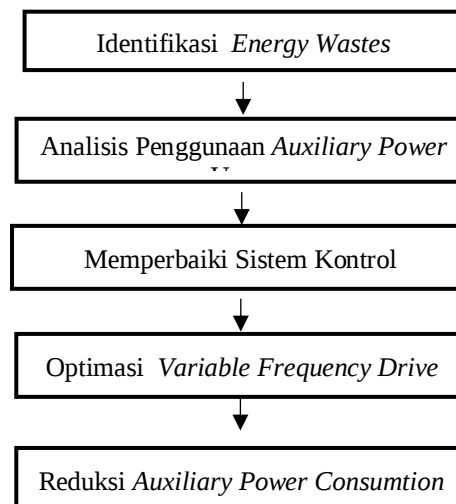
III. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Konsumsi Daya Bantu dan Efisiensi Energi

3.1.1 Identifikasi dan Analisis Konsumsi Daya Bantu

Konsumsi daya bantu (kWh aux) pada pembangkit listrik tenaga batu bara merupakan porsi yang signifikan dari total energi yang digunakan dan secara langsung memengaruhi efisiensi dan biaya operasional pembangkit secara keseluruhan. Sistem bantu mencakup peralatan penting seperti unit penanganan batu bara, pompa air umpan boiler, kipas angin, pompa kondensat, motor pendingin, dan sistem pencahayaan di dalam fasilitas. Mengoptimalkan konsumsi energi sistem-sistem ini dapat memberikan peningkatan substansial dalam kinerja pembangkit dan mendukung keberlanjutan operasional [9], [28].

Gambar 1 mengilustrasikan Diagram Alir Proses *Lean* yang dirancang untuk mengoptimalkan konsumsi daya bantu pada pembangkit listrik tenaga batu bara. Proses ini dimulai dengan mengidentifikasi pemborosan energi, diikuti dengan menganalisis penggunaan daya bantu di berbagai sistem. Setelah memahami pola konsumsi daya, langkah selanjutnya berfokus pada peningkatan sistem kontrol untuk mengelola penggunaan energi dengan lebih baik. Selanjutnya, implementasi *Variable Frequency Drive* (VFD) mengoptimalkan kecepatan motor secara real-time berdasarkan kebutuhan operasional, sehingga secara signifikan mengurangi konsumsi energi yang tidak perlu. Tahap terakhir bertujuan untuk mengurangi konsumsi daya tambahan, yang menghasilkan operasi pabrik yang lebih efisien, biaya yang lebih rendah, dan jejak lingkungan yang lebih kecil. Alur ini menunjukkan pendekatan sistematis *Lean Thinking* dalam meningkatkan keberlanjutan operasional.



Gambar 1. .Diagram Alir Proses Lean untuk Optimasi Konsumsi Auxiliary Power

3.1.2 Hasil Analisis dan Perbandingan Sebelum-Sesudah Lean

Studi ini menyajikan analisis mendalam tentang pola konsumsi daya tambahan di Pembangkit Listrik Tenaga Uap PT XYZ sebelum dan sesudah penerapan perbaikan operasional berbasis *Lean Thinking*, khususnya berfokus pada pemasangan penggerak frekuensi variabel (VFD) pada motor kritis dan optimalisasi kontrol operasional. Data dikumpulkan untuk dua periode utama, yaitu Juni 2021–Mei 2022 sebagai periode dasar sebelum *Lean* diterapkan, dan Januari–Desember 2024 sebagai periode setelah *Lean* diterapkan. Tabel 2 menunjukkan penurunan signifikan

dalam konsumsi daya tambahan dari 14,75% menjadi 11,75% dari total produksi listrik, dengan pengurangan yang signifikan pada komponen-komponen utama seperti pompa air umpan dan kipas udara primer, terutama karena pemasangan

Tabel 2. Konsumsi kWh Auxiliary Sebelum dan Setelah *Lean*

Periode	Sebelum <i>Lean</i>		Setelah <i>Lean</i>		Decrease
	1 Jun 2021– 1 May 2022	% A	1 Jan- 31 Des 2024	% B	% A-B
kWh Generator	113.883.840		123.272.160		
kWh Auxiliary					
1. Coal Handling	243.603	0.21%	217.921	0.18%	0.04%
2. Feed Water Pump	2.773.320	2.44%	1.892.580	1.54%	0.90%
3. Primary Air Fan	5.307.572	4.66%	2.746.872	2.23%	2.43%
4. Secondary Air Fan	2.076.960	1.82%	2.080.620	1.69%	0.14%
5. Induced Draft Fan	2.342.520	2.06%	3.233.220	2.62%	- 0.57%
6. Circulating W.P	326.250	0.29%	340.065	0.28%	0.01%
7. Clarifier Tr	252.990	0.22%	270.090	0.22%	0.00%
8. Demin Tr	1.928.160	1.69%	2.030.400	1.65%	0.05%
9. Low auxiliary Tr	1.549.317	1.36%	1.684.199	1.37%	- 0.01%
Total	16.800.692	14.75%	14.495.967	11.76%	2.99%

Pembangkit ini menghasilkan total 113.883.840 kWh listrik per tahun sebelum optimasi dan meningkat menjadi 123.272.160 kWh per tahun setelah optimasi, yang menunjukkan peningkatan kapasitas produksi dan output. Namun, konsumsi daya tambahan sebagai persentase dari total produksi menunjukkan penurunan yang signifikan dari 14,75% menjadi 11,75%. Penurunan ini mencerminkan pengurangan relatif dalam konsumsi energi oleh sistem tambahan, yang berarti peningkatan efisiensi bersih keseluruhan pembangkit [28].

Rincian konsumsi daya dari berbagai peralatan tambahan menunjukkan penghematan energi yang signifikan dalam beberapa komponen utama. Pompa air umpan, yang memainkan peran penting dalam memasok air ke boiler, mengalami penurunan konsumsi daya dari 2,44% menjadi 1,54% dari total produksi. Demikian pula, kipas udara primer menurun secara signifikan dari 4,66% menjadi 2,33%, dan kipas udara sekunder menunjukkan sedikit penurunan dari 1,82% menjadi 1,69%. Penurunan ini terutama disebabkan oleh penggantian sistem kontrol katup atau peredam konvensional dengan teknologi VFD, yang memungkinkan kecepatan motor disesuaikan secara dinamis sesuai dengan kebutuhan proses aktual, sehingga menghilangkan atau sistem kontrol peredam dengan teknologi VFD, yang memungkinkan kecepatan motor disesuaikan secara dinamis sesuai dengan kebutuhan aktual sehingga menghilangkan pemborosan energi karena mengoperasikan motor pada kecepatan tetap [18], [20].

Sebaliknya, kipas induksi menunjukkan sedikit peningkatan konsumsi daya, dari 2,06% menjadi 2,62%. Peningkatan ini dipandang sebagai penyesuaian yang diperlukan untuk menjaga stabilitas boiler dan kondisi pembakaran yang efisien, sebagai kompensasi atas perubahan dinamika aliran udara yang disebabkan oleh optimalisasi sistem bantu lainnya. Menjaga stabilitas pembakaran sangat penting untuk efisiensi pabrik secara keseluruhan dan pengendalian emisi, sehingga peningkatan beban bantu di bagian ini dapat diterima dalam konteks peningkatan efisiensi bersih [10], [27].

3.1.3 Dampak Operasional dan Lingkungan

Secara keseluruhan, penerapan Lean Thinking dan peningkatan teknologi menghasilkan pengurangan konsumsi daya bantu sekitar 2,99% dari total produksi. Dengan kata lain, ini setara dengan penghematan 29,9 kWh untuk setiap 1000 kWh listrik yang dihasilkan. Jika dihitung selama produksi tahunan, penghematan energi bantu mencapai sekitar 3.599.547 kWh sepanjang tahun 2024, yang merupakan peningkatan signifikan dalam operasi. Pengurangan konsumsi daya bantu ini tidak hanya meningkatkan efisiensi pembangkit, tetapi juga berdampak langsung pada pengurangan biaya operasional dengan mengurangi penggunaan listrik dan konsumsi batu bara yang harus diseimbangkan untuk kebutuhan beban bantu. Peralihan ke kontrol kecepatan variabel memungkinkan penyetelan peralatan yang lebih presisi, mengurangi waktu operasional dan pemborosan energi yang tidak perlu, sekaligus mempertahankan atau meningkatkan keandalan sistem [4], [9].

Selain manfaat ekonomi, pengurangan konsumsi daya bantu juga berdampak positif terhadap kinerja lingkungan pembangkit listrik dengan mengurangi kebutuhan bahan bakar dan emisi. Energi yang dihemat mengurangi jejak karbon per unit listrik yang dihasilkan, sehingga mendukung tujuan pengurangan gas rumah kaca global [22], [23]. Peningkatan efisiensi operasional ini juga sejalan dengan prinsip-prinsip manajemen energi berkelanjutan yang menekankan pengurangan kerugian dan optimalisasi penggunaan sumber daya [12], [14].

Hasil ini memperkuat efektivitas perangkat *Lean Thinking* dalam industri yang intensif energi, sebagaimana didokumentasikan dalam studi yang menggunakan pemetaan aliran nilai dan strategi eliminasi pemborosan untuk mengurangi beban bantu dan meningkatkan kinerja pembangkit secara keseluruhan [18], [19]. Pengurangan konsumsi daya bantu yang signifikan di PT XYZ menunjukkan potensi penerapan metodologi Lean secara luas pada pembangkit listrik tenaga batu bara lainnya di seluruh dunia, terutama di lokasi yang masih menggunakan operasi manual dan teknologi kontrol lama.

Integrasi teknologi seperti VFD dengan *prinsip Lean* menunjukkan peran krusial inovasi dan pengendalian proses dalam mencapai efisiensi energi. Kombinasi ini memungkinkan adaptasi terhadap perubahan kondisi proses dan variasi kualitas bahan bakar, meningkatkan responsivitas, dan meminimalkan pemborosan energi [20], [21].

Sebagai kesimpulan, analisis konsumsi daya bantu menunjukkan bahwa intervensi *Lean Thinking* yang terfokus, didukung oleh peningkatan teknologi dan pemantauan berkelanjutan, secara signifikan mengurangi penggunaan energi pada sistem bantu utama. Pengurangan ini meningkatkan efisiensi bersih pembangkit, mengurangi konsumsi bahan bakar, dan mendukung keberlanjutan lingkungan tanpa mengorbankan keandalan operasional. Temuan ini memberikan dasar empiris yang kuat untuk penerapan prinsip Lean dalam pengelolaan sistem bantu pembangkit listrik guna mencapai manfaat ekonomi dan ekologi.

3.1.4 Analisis Ekonomi dan ROI Investasi Inverter

Berdasarkan hasil optimasi Lean thinking pada system Auxiliary power, terjadi pengurangan konsumsi daya bantu sebesar 2.99% dari total produksi listrik atau 3.599.547 kWh per tahun.

- Konversi Penghematan ke Penghematan Batubara: Dari data sebelum lean, konsumsi batubara untuk menghasilkan listrik 1.345 kg/kWh, Maka penghematan batubara akibat penurunan *Auxiliary Power* adalah

$$\begin{aligned}\text{Penghematan Batu bara} &= 3.599.547 \text{ kWh} \times 1,3450 \text{ kg/kWh} \\ &= 4.841.391 \text{ kg} = 4841 \text{ ton}\end{aligned}$$

- Nilai Ekonomi Batu bara ; Dari data internal, harga rata-rata batubara di tahun 2024 adalah Rp 965/kg

$$\begin{aligned}\text{Nilai Penghematan} &= 4.841 \text{ ton} \times \text{Rp } 965.000 / \text{ton} \\ &= \text{Rp } 4.671.565.000/\text{tahun}\end{aligned}$$

- Perhitungan ROI : Dari data internal, investasi inverter untuk *Feed Water*, *Primary air Fan* dan *Secondary air Fan* sebesar sebesar Rp 1.995.000.000. ROI dihitung dengan rumus :

$$\begin{aligned}\text{ROI} &= \frac{\text{Total Penghematan Tahunan}}{\text{Investasi}} \times 100\% \\ \text{ROI} &= \frac{\text{Rp } 4.671.565.000}{\text{Rp } 2.195.000.000} \times 100\% = 212.83\%\end{aligned}$$

- Payback Period ; Payback Period = Investasi/ Penghematan per tahun
Payback Period = $\frac{\text{Rp } 2.195.000.000}{\text{Rp } 4.671.565.000} = 0.4699 \text{ tahun} = 5.64 \text{ bulan}$

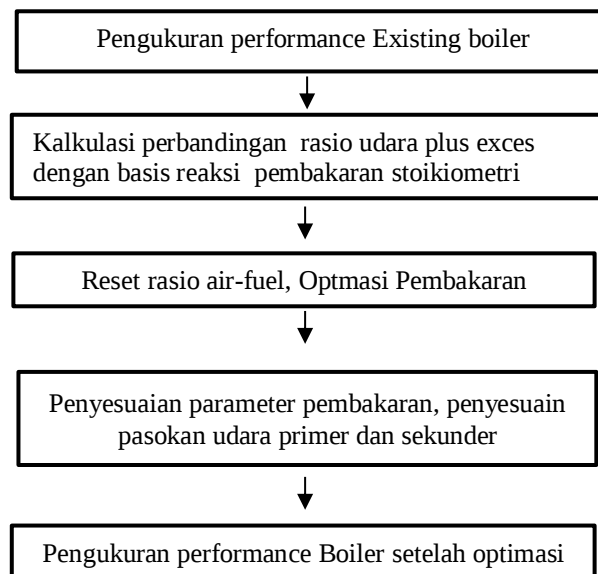
Hasil perhitungan diatas menunjukan bahwa investasi inverter sebesar Rp 1.995.000.000 dapat kmbali dalam waktu 5.64 bulan beroperasi. ROI yang sanat tinggi (212.83%) per tahun) ini menunjukan penerapan inverter atau VFD (*Variable Frequency Drive*) pada system *Auxiliary* merupakan langkah investasi yang sangat menguntungkan, sekaligus memberikan manfaat lingkungan berupa pengurangan konsumsi batubara sebesar 4841 ton per tahun.

3.2 Optimasi Efisiensi Boiler

Bagian ini membahas evaluasi peningkatan kinerja boiler yang dihasilkan dari penerapan *Lean Thinking* di PLTU PT XYZ. Efisiensi boiler merupakan parameter krusial yang memengaruhi konsumsi bahan bakar, produksi uap, dan pada akhirnya efektivitas konversi energi secara keseluruhan di PLTU. Optimasi proses pembakaran dan parameter operasional dalam sistem boiler berkontribusi signifikan terhadap pengurangan kehilangan energi dan minimalisasi emisi lingkungan [8], [9], [11], [12].

Gambar 2 Diagram alir ini mengilustrasikan langkah-langkah yang terlibat dalam optimasi kinerja boiler melalui prinsip-prinsip Lean Thinking. Proses ini dimulai dengan mengukur kinerja boiler yang ada, yang mencakup evaluasi parameter pembakaran seperti rasio udara-bahan bakar berdasarkan reaksi pembakaran stoikiometris. Selanjutnya, intervensi Lean diterapkan, dengan fokus pada pengaturan ulang rasio udara-bahan bakar dan optimasi pembakaran dengan menyesuaikan pasokan udara primer dan sekunder. Tahap terakhir melibatkan pengukuran peningkatan kinerja

boiler setelah optimasi, yang menghasilkan peningkatan produksi uap dan pengurangan konsumsi batubara. Langkah-langkah ini dirancang untuk mengurangi kehilangan energi, meminimalkan emisi lingkungan, dan meningkatkan efisiensi boiler secara keseluruhan.



Gambar 2. Diagram Alir Proses Lean untuk Optimasi Effisiensi Boiler

3.2.1 Kinerja Boiler Sebelum Optimasi

Sebelum intervensi Lean, boiler beroperasi dengan pengaturan standar yang mengacu pada data pembakaran historis dan variasi kualitas batubara dari pemasok. Batubara yang digunakan memiliki nilai kalor antara 4000 hingga 4200 kkal/kg dan menunjukkan variasi kadar air, abu, zat volatil, dan karbon tetap, yang semuanya memengaruhi stabilitas dan efisiensi pembakaran[9], [15]. Pengukuran awal menunjukkan produksi uap sekitar 4,98 ton per ton batubara dengan konsumsi batubara 1,27 kg per kWh uap yang dihasilkan. Tabel 3 menunjukkan parameter operasi sebelum dan sesudah intervensi Lean, dengan peningkatan produksi uap dan efisiensi konsumsi batubara setelah optimasi Lean, yang mencerminkan peningkatan kinerja boiler.

Tabel 3.. Parameter Operasional Sebelum dan Setelah *Lean* (Optimasi Boiler)

	Unit	Before Lean (Jan-Sep 2024)	After Lean (Oct-Dec 2024)
Electricity Production	kWh	83.860.800	32.129.280
Steam Production	kg	56.8314.600	203.490.000
Coal	kg	114.221.618	39.419.830
Steam/Coal	kg/kg	4.98	5.16
Steam/kWh	kg/kWh	6.32	6.33
Coal/kWh	kg/kWh	1.27	1.23

3.2.2 Optimasi Proses Pembakaran

Lean Thinking merupakan pedoman untuk mengoptimalkan rasio udara-bahan bakar dan parameter pembakaran berdasarkan perhitungan stoikiometri dan pemantauan waktu nyata (real-time). Proses ini melibatkan penyesuaian pasokan udara primer dan sekunder untuk mencapai tingkat udara berlebih yang optimal, memastikan pembakaran sempurna sekaligus meminimalkan pembentukan slag, fouling, dan karbon yang tidak terbakar. Optimasi juga mempertimbangkan perilaku termal di ruang bakar untuk meningkatkan efisiensi perpindahan panas dan mengurangi kehilangan panas melalui blowdown uap dan gas buang[10], [11], [23].

3.2.3 Peningkatan Kuantitatif Setelah Optimasi

Setelah penerapan optimasi pembakaran berbasis Lean, boiler menunjukkan peningkatan kinerja yang signifikan selama periode pemantauan tiga bulan. Produksi uap per ton batubara meningkat sebesar 3,75% dari 4,98 menjadi

5,16 ton per ton, yang menunjukkan peningkatan efisiensi konversi energi batubara menjadi energi termal. Konsumsi batu bara per kWh uap menurun sebesar 3,48%, dari 1,27 menjadi 1,23 kg/kWh, yang menunjukkan pengurangan penggunaan bahan bakar untuk output energi yang sama. Peningkatan ini setara dengan penghematan batu bara sekitar 1,42 juta kilogram selama periode pemantauan, yang berdampak langsung pada pengurangan biaya operasional dan emisi.

3.2.4 Pengaruh Variasi Kualitas Batubara

Variasi dalam analisis proksimat dan ultimat batubara memerlukan strategi operasional yang adaptif untuk mempertahankan efisiensi pembakaran. Kadar air dan fraksi abu memengaruhi suhu ruang bakar dan kecenderungan pembentukan terak, sehingga memerlukan penyesuaian pasokan udara dan laju bahan bakar. Integrasi prinsip-prinsip Lean memungkinkan respons dinamis terhadap variasi ini, mempertahankan kinerja pembakaran yang konsisten, dan mengurangi pemborosan bahan bakar. Optimalisasi adaptif ini sangat penting dalam pembangkit listrik tenaga batu bara yang bergantung pada fluktuasi kualitas bahan bakar akibat heterogenitas pemasok [15], [23].

Tabel 4 menyajikan data hasil analisis proksimat batubara secara internal di pabrik, yang dikumpulkan dari data dari proksimate analisis dari Januari sampai Desember 2024.:

Tabel 4. Data Proximate analisis batu bara dari Januari-Desember 2024:

Bulan	TM	Ash	Volatile Matter	Fixed Carbon	Total Sulfur	Gross Caloric Value
	% wt	% wt	% wt	% wt	% wt	kkal/kg
Jan-24	33.14	5.91	32.49	28.46	0.52	4,211
Feb-24	34.32	4.86	31.96	28.85	0.24	4,210
Mar-24	33.79	5.69	30.33	30.20	1.45	4,099
Apr-24	33.90	4.32	31.82	29.96	0.69	4,220
May-24	34.01	5.69	30.93	29.37	0.55	4,164
Jun-24	36.68	4.49	31.40	27.43	0.47	3,938
Jul-24	34.54	5.37	32.13	27.97	0.77	4,123
Aug-24	32.25	9.03	32.40	26.33	1.06	4,126
Sep-24	33.56	3.96	32.32	30.16	0.48	4,228
Oct-24	31.92	5.54	32.78	29.77	0.45	4,197
Nov-24	37.28	4.48	31.25	26.98	0.44	3,893
Des 24	32.52	6.12	32.27	29.10	0.41	4,112

Variasi Gross Calori Value batubara dalam rentang 3893 – 4228 kkal/kg memberikan pengaruh yang signifikan terhadap stabilitas pembakaran dan efisiensi konversi energi. Pada saat nilai kalori pada titik terendah, 3398 kkal/kg di bulan Juni 2024, PLTU harus meningkatkan laju aliran bahan bakar untuk menjaga output steam dan listrik sesuai target, yang berpotensi meningkatkan konsumsi batubara. Sebaliknya nilai kalori yang tinggi, 4228 kkal/kg di bulan Oktober memberikan kondisi pembakaran yang lebih efisien dengan kebutuhan bahan bakar lebih rendah. Fluktuasi ini menuntut pengendalian rasio udara bahan bakar yang adaptif untuk menghindari pemborosan energi dan meminimalkan energi yang tidak diinginkan.

Selain nilai Gross Calori Value, Kadar Total Moisture yang bervariasi antara 31.92 % - 37.28% turut mempengaruhi efisiensi termal. Kadar air tinggi mengurangi energi efektif yang tersedia untuk pembangkit karena sebagian energi digunakan untuk menaikkan temperatur dan menguapkan air selama proses pembakaran. Hal ini dapat menurunkan temperatur ruang bakar sehingga meningkatkan pembakaran tidak sempurna. Penyesuaian udara primer dan sekunder menjadi sangat krusial dalam kondisi agar pembakaran tetap stabil.

Faktor kandungan abu (ash) dan sulfur juga berkontribusi terhadap performa boiler dan dampak lingkungan. Kandungan abu tinggi dapat menurunkan efisiensi perpindahan panas. Sementara Sulfur tetap berpotensi meningkatkan emisi Sox terutama pada saat rasio udara tidak terkontrol dengan baik. Dengan strategi optimasi Lean berbasis Lean Thinking yang menekankan parameter udara adaptif merupakan Langkah yang sangat penting di tengah variabilitas kualitas batubara.

3.2.5 Integrasi dengan Optimalisasi Sistem Bantu

Peningkatan efisiensi boiler merupakan pelengkap dari pengurangan konsumsi daya bantu yang telah dicapai. Dengan mengoptimalkan sistem kelistrikan bantu dan proses pembakaran termal secara bersamaan, pembangkit listrik telah berhasil meningkatkan efisiensi energi secara holistik. Pendekatan ganda ini menunjukkan potensi sinergis penerapan metodologi Lean di berbagai subsistem dalam fasilitas pembangkit listrik [12], [13], [23].

3.2.6 Implikasi Operasional dan Lingkungan

Peningkatan efisiensi boiler mengurangi konsumsi bahan bakar dan emisi gas rumah kaca, sehingga berkontribusi pada keberlanjutan ekonomi dan lingkungan. Dari perspektif operasional, peningkatan stabilitas pembakaran dan berkurangnya pembentukan slag juga mengurangi frekuensi perawatan dan memperpanjang umur peralatan, yang pada akhirnya meningkatkan ketersediaan dan keandalan pembangkit.[15], [17], [23]

3.2.7 Ringkasan

Singkatnya, optimasi boiler berbasis Lean Thinking di PLTU PT XYZ menghasilkan peningkatan yang terukur dalam efisiensi produksi uap dan pemanfaatan bahan bakar. Peningkatan ini tidak hanya mengurangi biaya operasional melalui penghematan batubara yang signifikan, tetapi juga mendukung tujuan pembangkit listrik berbahan bakar batubara yang lebih bersih dan berkelanjutan. Temuan ini menggarisbawahi pentingnya mengintegrasikan optimasi proses dengan kerangka kerja manajemen lingkungan untuk mencapai peningkatan efisiensi yang komprehensif di PLTU [10] [15], [17], [23].

3.3 Penilaian Dampak Lingkungan

3.3.1 Metodologi dan Ruang Lingkup Penilaian

Penilaian dampak lingkungan dari peningkatan operasional di pembangkit listrik tenaga batu bara PT XYZ dilakukan menggunakan metodologi Penilaian Siklus Hidup (Life Cycle Assessment/LCA), dengan fokus pada kategori dampak utama yaitu Potensi Pengasaman, Potensi Pemanasan Global (GWP), dan dampak kesehatan manusia terkait emisi partikulat. Penilaian ini bertujuan untuk mengevaluasi secara kuantitatif bagaimana peningkatan efisiensi yang didorong oleh Lean Thinking berdampak pada jejak lingkungan pembangkit listrik di sepanjang siklus hidupnya, sehingga memberikan perspektif komprehensif yang melampaui metrik operasional semata[13], [23], [29].

Dengan menggunakan perangkat lunak Open LCA yang terintegrasi dengan metode penilaian dampak TRACI 2.1, data emisi dan konsumsi sumber daya dari fase operasional sebelum dan sesudah implementasi Lean dianalisis. Batasan sistem mencakup semua proses utama, termasuk penanganan batu bara, pembakaran boiler, pengoperasian turbin, dan pembangkitan listrik, dengan unit fungsional didefinisikan per kilowatt-jam (kWh) listrik yang dihasilkan. Inventarisasi LCA mencakup konsumsi batubara, penggunaan listrik tambahan, serta emisi gas rumah kaca (CO₂, CH₄, N₂O) dan polutan udara (SO_x, NO_x, partikulat) yang diperoleh dari catatan operasional dan analisis laboratorium.[27], [31], [32]. Tabel 5 menunjukkan data inventaris untuk Juni 2021 hingga Mei 2022, sebelum implementasi Lean, bersama dengan data dari Januari 2024 hingga September 2024 dan Oktober 2024 hingga Desember 2024, setelah intervensi Lean.

Table 5. Inventory Jun 2021 – Mei 2022

Category	Inventory	Amount	Amount	Amount	unit
Input	Data	Jun 2021- Mei 2022	Jan 2024-Sep 2024	Oct 2024-Dec 2024	
Fuel/Energy	Coal	153.267.464	114.221.618	39.419.830	Kg
	Electricity	16.904.448	10.550.112	3.857.856	kWh
Output					
Product	Electricity	113.883.840	89.860.800	32.129.280	kWh
	Steam	285.236.300	221.309.200	75.873.000	kg
Emission To					
Air	CO ₂	245.272.076	183.522.303	63.336.679	kg
	SO _x	7.730.988	5.655.645	1.951.860	kg
	NO _x	1287.447	1.233.593	425.734	kg

3.3.2 Hasil Penilaian Dampak

Hasilnya menunjukkan dampak lingkungan yang kompleks namun secara keseluruhan positif akibat intervensi Lean. Penilaian Potensi Pengasaman menunjukkan peningkatan marginal setelah optimalisasi sistem bantu saja. Peningkatan ini terutama disebabkan oleh peningkatan emisi sulfur oksida (SO_x) dan nitrogen oksida (NO_x), yang merupakan prekursor pembentukan hujan asam. Emisi ini kemungkinan dipengaruhi oleh penyesuaian operasional terhadap kinerja peralatan dan pengaturan pasokan udara pembakaran, yang mencerminkan trade-off dalam optimalisasi proses[16], [23].

Sebaliknya, Potensi Pemanasan Global telah menurun secara signifikan setelah optimalisasi gabungan konsumsi daya bantu dan efisiensi pembakaran boiler. Penurunan konsumsi batubara karena peningkatan efisiensi pembakaran

dan pengurangan kebutuhan daya bantu memiliki dampak langsung pada pengurangan emisi CO₂, gas rumah kaca dominan yang berkontribusi terhadap perubahan iklim. Penurunan ini sejalan dengan tujuan global untuk meminimalkan jejak karbon dari pembangkitan energi berbasis bahan bakar fosil dan mencerminkan efektivitas mengintegrasikan praktik operasional Lean dengan manajemen lingkungan [15], [17], [21].

Untuk dampak kesehatan manusia, terutama emisi partikulat, hasil LCA menunjukkan sedikit peningkatan setelah optimasi sistem bantu, meskipun efek ini berkurang ketika optimasi boiler juga diperhitungkan. Emisi partikulat, yang berdampak langsung pada kesehatan pernapasan dan kardiovaskular, dipengaruhi oleh kondisi pembakaran dan mekanisme pengendalian partikulat. Studi ini menyoroti pentingnya menyeimbangkan peningkatan efisiensi energi dengan penerapan strategi pengendalian emisi yang efektif untuk meminimalkan dampak negatif terhadap kesehatan manusia [16], [23], [29].

Tabel perbandingan penilaian dampak semakin memperjelas tren ini. Tabel 6 menunjukkan total hasil dampak selama periode pemantauan, yang mencerminkan variasi dalam kategori pengasaman, pemanasan global, dan partikulat. Tabel 7 berfokus pada dampak per kWh yang terkait dengan optimasi sistem tenaga bantu saja, yang menunjukkan peningkatan dalam kategori pengasaman dan kesehatan manusia meskipun terdapat peningkatan potensi pemanasan global. Tabel 8 mengilustrasikan manfaat lingkungan dari optimasi boiler, dengan penurunan di semua kategori dampak. Terakhir, Tabel 9 mensintesis efek gabungan, yang menunjukkan penurunan bersih dalam GWP tetapi hasil yang beragam untuk pengasaman dan kesehatan manusia, yang menyoroti kompleksitas hasil dari perubahan operasional terintegrasi.

Tabel 6. Impact assessment dari operasi power plant

Period	Unit	Jun 2021- May 2022	Jan-Sep 2024	Oct-Dec 2024
Acidification	Kg SO ₂ eq	1.252.722	1.707.861	1.168.190
Global Warming	Kg CO ₂ eq	2.553.047.925	2.539.345.505	1.810.605.259
Human health- Particulate matter	PM 2.5 eq	76.555	104.369	71

Tabel 7. Impact assessment dari efisiensi konsumsi auxiliary power sebelum dan setelah lean per kWh produk.

Period	Unit	Before Lean Jun 2021- May 2022	After Lean Jan-Sep 2024	% Decrease
Acidification	Kg SO ₂ eq	0.011	0.014	-27.27%
Global Warming	Kg CO ₂ eq	22.418	20.816	7.15 %
Human health- Particulate matter	PM 2.5 eq	0.000672222	0.000855556	-27.27%

Tabel 8. Impact assessment dari optimasi boiler sebelum dan setelah lean per kWh produk

Periode	Unit	Before Lean Jan-Sep 2024	After Lean Oct-Dec 2024	% Decrease
Acidification	Kg SO ₂ eq	0.014	0.013	7.14%
Global Warming	Kg CO ₂ eq	20.816	20.150	3.20%
Human health- Particulate matter	PM 2.5 eq	0.000855556	0.000794444	7.14

Tabel 9. Impact assessment efisiensi konsumsi auxiliary power dan optimasi boiler sebelum dan setelah lean per kWh product

Period	Unit	Before Lean Jun 2021- May 2022	After Lean Oct-Dec 2024	% Decrease
Acidification	Kg SO ₂ eq	0.011	0.013	-18.18%
Global Warming	Kg CO ₂ eq	22.418	20.150	10.12 %
Human health- Particulate matter	PM 2.5 eq	0.000672222	0.000794444	-18.18%

3.3.3 Interpretasi dan Implikasi

Temuan-temuan ini mencerminkan sifat multifaset dari dampak lingkungan pada operasi pembangkit listrik, di mana perbaikan dalam satu aspek dapat secara tidak langsung memengaruhi aspek-aspek lain. Hasil-hasil ini menggarisbawahi pentingnya manajemen proses holistik dan integrasi Lean Thinking dengan kerangka kerja penilaian lingkungan seperti LCA untuk mengidentifikasi dan memitigasi potensi trade-off negatif. Selain itu, hasil-hasil ini

menyoroti peran penting parameter kontrol operasional seperti rasio udara berlebih, variasi kualitas bahan bakar, dan kalibrasi peralatan dalam menentukan profil emisi[10], [11].

Sebagai kesimpulan, penilaian dampak lingkungan ini memvalidasi bahwa efisiensi operasional berbasis Lean dapat secara substansial mengurangi jejak karbon pembangkit listrik tenaga batu bara, sehingga berkontribusi pada mitigasi perubahan iklim. Namun, peningkatan kecil dalam emisi pengasaman dan partikulat memerlukan pemantauan berkelanjutan dan langkah-langkah pengendalian polusi tambahan. Penerapan gabungan Lean Thinking dan LCA terbukti menjadi pendekatan yang efektif untuk mengoptimalkan konsumsi energi sambil mempertimbangkan aspek lingkungan dan kesehatan, membuka jalan bagi praktik pembangkit listrik fosil yang lebih berkelanjutan.[12], [13].

3.3.4 Mitigasi Risiko akibat Peningkatan Hujan Asam dan Particulate Matter

Peningkatan kecil pada potensi pengasaman dan emisi partikulat setelah optimasi Auxilliary sytem memerlukan strategi mitigasi untuk meminimalkan dampak negative terhadap lingkungan dan Kesehatan masyarakat. Potensi pengasaman yang disebabkan oleh emisi Sox dan NOx dapat mempercepat pembentukan hujan asam yang berdampak pada degradasi ekosistem, korosi infrastruktur, dan penurunan kualitas air. Sementara itu peningkatan emisi partikulat berukuran halus (PM2.5) dapat meningkatkan resiko gangguan pernafasan dan kardiovaskular bagi masyarakat di sekitar wilayah pembangkit. Beberapa Langkah mitigasi yang dapat diterapkan antara lain:

- Analisis parameter Sulfur di setiap kedatangan batu bara. Dari data internal, Sulfur maksimum 0.8%. Bila Sulfur diatas itu, maka batubara harus dicampur dengan batubara Sulfur rendah sehingga kandungan Sulfur yang masuk boiler memenuhi syarat operasional boiler.
- Bila batubara yang kandungan Sulfur tidak tersedia, maka batubara yang akan masuk boiler ditambahkan bahan penangkap yaitu CaCO_3 sehingga Sulfur dari pembakaran tidak terbuang ke udara.
- Pengaturan rasio udara-bahan bakar yang lebih presisi pasca implementasi Lean untuk menekan olutan tanpa mengurangi efisiensi pembakaran
- Electrostatic Precipitators (ESP) untuk menangkap partikulat halus sebelum dilepaskan ke udara. [33], [34]

Integrasi teknologi control polusi ini dengan pendekatan Lean Thinking dan LCA akan memastikan bahwa peningkatan efisiensi energi tidak disertai dengan kenaikan signifikan polutan penyebab hujan asam dan partikulat. Pendekatan ini juga mendukung kepatuhan terhadap regulasi lingkungan nasional dan internasional serta meningkatkan citra keberlanjutan perusahaan.

3.4 Diskusi

Temuan studi ini menunjukkan potensi signifikan integrasi metodologi Lean Thinking dengan Life Cycle Assessment (LCA) untuk meningkatkan efisiensi energi dan keberlanjutan lingkungan di pembangkit listrik tenaga batu bara. Penurunan konsumsi daya bantu dan peningkatan efisiensi boiler yang teramati sejalan dengan literatur yang menegaskan Lean Thinking sebagai strategi efektif untuk menghilangkan pemborosan operasional dan mengoptimalkan kinerja dalam sistem energi industri[12], [18], [19]. Pembahasan ini menguraikan implikasi dari temuan-temuan tersebut, menempatkannya dalam konteks akademis yang lebih luas, dan mengeksplorasi pertimbangan serta tantangan praktis yang terkait dengan penerapan pendekatan Lean-LCA terintegrasi di sektor pembangkit listrik.

Penerapan prinsip-prinsip Lean di pembangkit listrik PT XYZ secara efektif mengatasi sumber utama pemborosan energi, terutama melalui pemasangan penggerak frekuensi variabel (inverter) pada peralatan bantu bermotor. Transisi dari operasi kecepatan tetap ke kecepatan variabel memungkinkan penyesuaian dinamis konsumsi daya terhadap kebutuhan proses aktual, sehingga secara substansial mengurangi konsumsi listrik yang tidak perlu. Hasil ini menguatkan penelitian sebelumnya yang menyoroti efektivitas alat Lean seperti Value Stream Mapping dan Six Sigma dalam mengurangi pemborosan energi dan meningkatkan ketersediaan peralatan di pembangkit listrik termal[18], [19], [20]. Pengurangan signifikan dalam konsumsi daya tambahan—dari 14,75% menjadi 11,75% dari total produksi—mewakili peningkatan operasional yang signifikan dengan manfaat langsung terhadap biaya dan lingkungan.

Optimalisasi proses pembakaran boiler menghasilkan peningkatan yang terukur dalam efisiensi produksi uap dan pemanfaatan bahan bakar. Produksi uap meningkat sebesar 3,75% per ton batubara dan konsumsi batubara menurun sebesar 3,48% sejalan dengan penerapan kontrol proses berbasis Lean dan analisis stoikiometri. Temuan ini sejalan dengan studi sebelumnya yang menekankan pentingnya kontrol rasio udara-bahan bakar yang tepat dan strategi operasional adaptif untuk mengakomodasi variabilitas kualitas bahan bakar, meningkatkan efisiensi pembakaran, dan meminimalkan pembentukan polutan[9], [11], [15]. Peningkatan ini tidak hanya menurunkan biaya bahan bakar tetapi juga mengurangi emisi gas rumah kaca, sejalan dengan upaya global untuk meminimalkan jejak karbon dari pembangkitan energi berbasis fosil[17], [21].

Komponen Penilaian Siklus Hidup mengungkapkan interaksi yang kompleks antara efisiensi operasional dan dampak lingkungan. Sementara potensi pemanasan global (GWP) menurun secara signifikan setelah penerapan Lean,

yang mencerminkan pengurangan emisi CO₂, ada peningkatan kecil dalam potensi pengasaman dan dampak kesehatan manusia yang terkait dengan emisi partikulat dalam beberapa skenario. Kompromi ini menyoroti tantangan inheren dalam mengoptimalkan tujuan lingkungan yang multifaset secara simultan. Studi serupa telah melaporkan temuan serupa, di mana peningkatan efisiensi energi dapat menyebabkan pergeseran profil emisi yang memerlukan pendekatan manajemen holistik[16], [29]. Oleh karena itu, hasil ini menekankan pentingnya menggabungkan peningkatan operasional Lean dengan sistem pengendalian emisi dan pemantauan lingkungan yang tangguh.

Fluktuasi beban operasional, yang didorong oleh permintaan produksi yang bervariasi dari mesin kertas yang terhubung, menghadirkan tantangan inheren dalam mempertahankan efisiensi yang konsisten. Studi ini mencatat bahwa penghentian yang tidak terduga dan variasi beban menyebabkan kerugian energi akibat pemanfaatan bahan bakar dan sistem bantu yang kurang optimal. Lean Thinking membantu mengidentifikasi dan memitigasi inefisiensi ini dengan memungkinkan mekanisme kontrol yang lebih fleksibel dan responsif. Model operasional adaptif ini sangat penting dalam lingkungan industri yang dicirikan oleh permintaan yang dinamis dan kualitas bahan bakar yang bervariasi, mendukung kinerja pabrik yang tangguh dan berkelanjutan[12], [13].

Integrasi Lean Thinking dengan LCA menawarkan kerangka kerja komprehensif untuk manajemen pembangkit listrik berkelanjutan. Lean berfokus pada efisiensi proses dan pengurangan limbah, sementara LCA memberikan perspektif evaluatif tentang beban lingkungan di seluruh siklus hidup sistem. Sifat komplementer dari kedua pendekatan ini memungkinkan pengambilan keputusan yang menyeimbangkan prioritas ekonomi dan lingkungan. Model terintegrasi ini mengisi kesenjangan penelitian yang ada pada penilaian keberlanjutan holistik pembangkit listrik tenaga batu bara dan menetapkan preseden untuk studi masa depan yang bertujuan menyelaraskan metrik kinerja operasional dan lingkungan.[13], [27], [29].

Pertimbangan praktis dalam implementasi mencakup perlunya pengumpulan data berkelanjutan, pemantauan waktu nyata, dan kontrol adaptif untuk mempertahankan peningkatan efisiensi. Studi ini menekankan pentingnya berinvestasi dalam teknologi pendukung seperti inverter dan sistem kontrol proses canggih untuk sepenuhnya mewujudkan manfaat Lean. Selain itu, komunikasi dan pelatihan staf operasional yang efektif sangat penting untuk menginternalisasi prinsip-prinsip Lean dan memastikan kepatuhan prosedural. Faktor-faktor manusia dan teknologi ini merupakan penentu penting keberhasilan, sebagaimana terungkap dalam studi kasus sebelumnya di sektor energi[18], [19], [20].

Manfaat lingkungan yang diperoleh dari studi ini melampaui pengurangan emisi karbon. Dengan mengoptimalkan sistem pembakaran dan sistem pendukungnya, emisi polutan penyebab hujan asam dan dampak kesehatan dapat dikelola dengan lebih baik. Namun, peningkatan yang diamati pada beberapa kategori polutan memerlukan integrasi teknologi mitigasi emisi seperti desulfurisasi gas buang dan filter partikulat di samping intervensi Lean. Pendekatan multi-strategi ini akan meningkatkan kepatuhan terhadap peraturan lingkungan yang semakin ketat dan komitmen keberlanjutan perusahaan[16], [23], [29].

Keterbatasan studi ini mencakup durasi pemantauan pasca-implementasi yang relatif singkat, yang mungkin tidak sepenuhnya mencerminkan dinamika operasional jangka panjang dan dampak pemeliharaan. Selain itu, variabilitas kualitas batubara dan faktor lingkungan eksternal menambah kompleksitas dalam mengisolasi efek eksklusif dari intervensi Lean dan LCA. Penelitian di masa mendatang sebaiknya memperpanjang durasi pemantauan, mengeksplorasi kategori dampak tambahan, dan mempertimbangkan perbandingan lintas pembangkit untuk menggeneralisasi temuan dan menyempurnakan metodologi integratif[15], [23], [29].

Sebagai kesimpulan, studi ini menegaskan bahwa Lean Thinking yang terintegrasi secara sistematis dengan Life Cycle Assessment menawarkan jalur yang layak untuk meningkatkan efisiensi energi dan keberlanjutan lingkungan di pembangkit listrik tenaga batubara. Manfaat operasional dan ekologis yang telah terbukti memberikan wawasan berharga bagi manajer pembangkit listrik, pembuat kebijakan, dan peneliti yang ingin mengarahkan pembangkit listrik berbahan bakar fosil menuju model yang lebih berkelanjutan. Temuan ini mendorong adopsi kerangka kerja Lean-LCA terintegrasi yang lebih luas sebagai bagian dari strategi manajemen energi dan lingkungan yang komprehensif dalam lanskap energi global yang terus berkembang.[12] [17], [23].

IV. KESIMPULAN

Studi ini menunjukkan bahwa integrasi Lean Thinking dengan Life Cycle Assessment (LCA) secara signifikan meningkatkan efisiensi operasional dan keberlanjutan lingkungan pada pembangkit listrik tenaga termal berbahan bakar batu bara. Optimalisasi berbasis Lean secara substansial mengurangi konsumsi daya bantu dan meningkatkan efisiensi pembakaran boiler, yang menghasilkan penghematan batu bara dan emisi gas rumah kaca. Analisis LCA menyoroti pengurangan potensi pemanasan global secara keseluruhan, meskipun terdapat trade-off berupa peningkatan pengasaman dan emisi partikulat, yang menyoroti pentingnya manajemen lingkungan yang komprehensif beserta peningkatan operasional. Temuan ini berkontribusi pada pengembangan ilmu pengetahuan dengan memberikan bukti empiris tentang efektivitas penggabungan Lean dan LCA dalam sistem energi industri. Studi ini

menekankan peran penting kontrol proses adaptif dan pemantauan berkelanjutan untuk mengakomodasi variasi bahan bakar dan fluktuasi operasional. Studi selanjutnya direkomendasikan untuk memperpanjang durasi pemantauan, mengeksplorasi kategori dampak lingkungan tambahan, dan menguji penerapan pendekatan integratif ini di berbagai jenis pembangkit dan sumber bahan bakar. Secara keseluruhan, studi ini menawarkan model yang praktis dan komprehensif untuk mendorong pembangkitan listrik fosil yang lebih berkelanjutan dan efisien di tengah dinamika energi global yang terus berkembang.

REFERENSI

- [1] J. Sumberdaya Bumi Berkelanjutan, H. Citra Utami, T. Agung Cahyadi, R. Ernawati, and U. Pembangunan Nasional, "Peramalan Harga Batubara Menggunakan Fuzzy Time Series Lee." [Online]. Available: <https://ejurnal.itats.ac.id/semitan>
- [2] Suci Pujiani Prahesti, Itasia Dina Sulvianti, and Yenni Angraini, "PERAMALAN HARGA BATU BARA ACUAN MENGGUNAKAN METODE AUTOREGRESSIVE INTEGRATED MOVING AVERAGE DAN FUNGSI TRANSFER," *Xplore: Journal of Statistics*, vol. 12, no. 1, pp. 1–11, Jan. 2023, doi: 10.29244/xplore.v12i1.1100.
- [3] M. R. Ibrahim, A. Sudirman, and L. J. Tumulo, "Implikasi Dinamika Geopolitik Energi Rusia-Ukraina terhadap Keamanan Energi di Indonesia," *Arus Jurnal Sosial dan Humaniora (AJSH)*, vol. 4, Dec. 2024.
- [4] M. A. Raza, K. L. Khatri, S. Akbar, and M. I. U. Haque, "Towards Improving Technical Performance of a 747 MW Thermal Power Plant," *Quaid-e-Awam University Research Journal of Engineering Science & Technology*, vol. 19, no. 1, pp. 104–111, Jun. 2021, doi: 10.52584/qrj.1901.15.
- [5] Ghulam Qadir; Irfan Bhacho; Naeem Ahmed Mahoto, "Predicting the Energy Efficiency of Thermal Power Plant," 2020 3rd International Conference on Computing, Mathematics and Engineering Technologies (iCoMET), Jan. 2020.
- [6] Z. Maskur, R. Prabowo, and Syamsuri, "INTEGRASI RELIABILITY ENGINEERING DAN ENERGY MANAGEMENT UNTUK ANALISA OVERALL EQUIPMENT EFFECTIVENESS (STUDI KASUS: PLTU BATUBARA REMBANG)," *Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknologi III*, 2019.
- [7] A. Caswito and A. Hidayat Sutawijaya, "Analysis of Total Maintenance Productivity on Ships/Fleet To Increase Performance Using Overall Equipment Effectiveness (OEE) Method and Analysis of Six Big Losses (Case Study of PT. XYZ)," 2019.
- [8] P. D. b Hitesh R. Thakare a, "Enhancing energy conservation in power generation in a coal fired thermal power plant through comprehensive energy audit," *Energy*, vol. 301, Aug. 2024.
- [9] A. Lawrence, P. Thollander, M. Andrei, and M. Karlsson, "Specific energy consumption/use (SEC) in energy management for improving energy efficiency in industry: Meaning, usage and differences," *Energies (Basel)*, vol. 12, no. 2, Jan. 2019, doi: 10.3390/en12020247.
- [10] T. Zhang, "Methods of Improving the Efficiency of Thermal Power Plants," in *Journal of Physics: Conference Series*, Institute of Physics Publishing, Feb. 2020. doi: 10.1088/1742-6596/1449/1/012001.
- [11] N. K. Gavirineni and E. Gundabattini, "Enhancing the energy efficiency of a supercritical thermal power plant through improved plant load factor, and optimized performance of auxiliary equipment," *International Journal of Design and Nature and Ecodynamics*, vol. 17, no. 2, pp. 177–187, Apr. 2022, doi: 10.18280/ij dne.170203.
- [12] J. Singh, H. Singh, A. Singh, and J. Singh, "Managing industrial operations by lean thinking using value stream mapping and six sigma in manufacturing unit: Case studies," *Management Decision*, vol. 58, no. 6, pp. 1118–1148, Apr. 2020, doi: 10.1108/MD-04-2017-0332.
- [13] K. Ramsunder and O. Olanrewaju, "Energy Analysis via Value Stream Mapping: A case study of an Automotive Weld Plant," *ORION*, vol. 37, no. 2, Dec. 2021, doi: 10.5784/37-2-688.
- [14] A. I. Osman, N. Mehta, A. M. Elgarahy, A. Al-Hinai, A. H. Al-Muhtaseb, and D. W. Rooney, "Conversion of biomass to biofuels and life cycle assessment: a review," Dec. 01, 2021, Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. doi: 10.1007/s10311-021-01273-0.
- [15] A. Irawan, P. Studi Magister Teknik Kimia, U. Sultan Ageng Tirtayasa, and B. Abstract, "Pengaruh Biomassa Terhadap Efisiensi Boiler Pada Pembangkit CFB Batubara Dalam Sistem Co-firing," *Jurnal Ilmiah Wahana Pendidikan*, Februari, vol. 2023, no. 3, pp. 281–296, doi: 10.5281/zenodo.7625148.
- [16] M. R. Zaman and S. W. A. Suedy, "Pemanfaatan Batubara Kalori Rendah pada IGCC (Integrated Gasification Combined Cycle)," *Jurnal Energi Baru dan Terbarukan*, vol. 1, no. 1, pp. 35–44, Mar. 2020, doi: 10.14710/jebt.2020.11156.

- [17] R. Basosi, R. Bonciani, D. Frosali, G. Manfrida, M. L. Parisi, and F. Sansone, "Life cycle analysis of a geothermal power plant: Comparison of the environmental performance with other renewable energy systems," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 12, no. 7, pp. 1–29, Apr. 2020, doi: 10.3390/su12072786.
- [18] M. I. Hussain, M. Khalaf Albzeirat, R. Ahmad, I. Dewan, N. Khalid, and N. N. Zulkepli, "Explore Workplace Wastes, Source of Wastes, and Selecting Appropriate Lean Manufacturing Practices in Thermal Power Plants," 2020. [Online]. Available: <http://www.ijeai.com>
- [19] W. M. Goriwondo, B. Sarema, I. Chinhengo, and W. M. Goriwondo, "Application of Lean Tools in Planned Maintenance: Case Study of a Coal Handling Plant at a Thermal Power Station," 2020. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/352933903>
- [20] O. Devi and D. K. Putu, "Improving Overhaul Process on Steam Power Plants using Lean Thinking and LCA," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Institute of Physics Publishing, Apr. 2020. doi: 10.1088/1755-1315/448/1/012043.
- [21] S. A. Salah and A. Mustafa, "Integration of energy saving with lean production in a food processing company," *Journal of Machine Engineering*, vol. 21, no. 4, pp. 118–133, 2021, doi: 10.36897/jme/142394.
- [22] R. K. Mohammed and H. Farzaneh, "Life Cycle Environmental Impacts Assessment of Post-Combustion Carbon Capture for Natural Gas Combined Cycle Power Plant in Iraq, Considering Grassroots and Retrofit Design," *Energies (Basel)*, vol. 16, no. 3, Feb. 2023, doi: 10.3390/en16031545.
- [23] B. S. S. Wibawa, A. P. Iswara, and R. Boedisantoso, "Impact Assessment of Coal Power Plant Using Life Cycle Assessment (LCA)," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Institute of Physics Publishing, Jun. 2020. doi: 10.1088/1755-1315/506/1/012023.
- [24] S. Albar, J. Windarta, A. Y. Wardaya, and T. Elshaarani, "An Integrating PV plant 689 kWp into Coal-Fired Power Plant (CFPP) 615 MW at Paiton: To reduce auxiliary load and coal consumption," *Teknomekanik*, vol. 5, no. 2, pp. 103–111, Dec. 2022, doi: 10.24036/teknomekanik.v5i2.17072.
- [25] F. Mujayyin, dan Luwi Adi, P. Teknik Perawatan Mesin dan Peralatan Industri, A. Komunitas Semen Indonesia-Gresik Jl Veteran Gresik, and J. Timur, PRODUKTIVITAS PEMBANGKIT LISTRIK WASTE HEAT RECOVERY POWER GENERATION (WHRPG) PABRIK SEMEN.
- [26] Z. Jiang, Y. Zou, Y. Li, F. Kong, and D. Yang, "Environmental life cycle assessment of supercapacitor electrode production using algae derived biochar aerogel," *Biochar*, vol. 3, no. 4, pp. 701–714, Dec. 2021, doi: 10.1007/s42773-021-00122-1.
- [27] M. Komunikasi, D. Pengembangan, T. Lingkungan, D. T. Nugraheni, R. Purwana, and U. S. Hamzah, "Jurnal Presipitasi Environmental Impact Assessment of Co-firing Implementation at X Steam Power Plant, West Java," vol. 20, no. 2, pp. 334–344, 2023.
- [28] S. Albar, J. Windarta, A. Y. Wardaya, and T. Elshaarani, "An Integrating PV plant 689 kWp into Coal-Fired Power Plant (CFPP) 615 MW at Paiton: To reduce auxiliary load and coal consumption," *Teknomekanik*, vol. 5, no. 2, pp. 103–111, Dec. 2022, doi: 10.24036/teknomekanik.v5i2.17072.
- [29] R. Rasheed et al., "Life cycle assessment of a cleaner supercritical coal-fired power plant," *J Clean Prod*, vol. 279, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123869.
- [30] R. K. Mohammed and H. Farzaneh, "Life Cycle Environmental Impacts Assessment of Post-Combustion Carbon Capture for Natural Gas Combined Cycle Power Plant in Iraq, Considering Grassroots and Retrofit Design," *Energies (Basel)*, vol. 16, no. 3, Feb. 2023, doi: 10.3390/en16031545.
- [31] T. A. A. I. Haoxiang Lai a, "Life cycle analyses of SOFC/gas turbine hybrid power plants accounting for long-term degradation effects," *J Clean Prod*, vol. 412, Aug. 2023.
- [32] W. P. F. b Naser S. Matin a, "Life cycle assessment of amine-based versus ammonia-based post combustion CO2 capture in coal-fired power plants," *International Journal of Greenhouse Gas Control*, vol. 113, Jan. 2022.
- [33] Andri, Basuki, B.H. Seputro, E.S Kusuma, E, "Effort to Reduce SO2 Emission in Paiton Coal-Fired Power Plant," *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, vol. 1096, Mar. 2021.
- [34] Ren, Yujia, Wu. Qingru, Wen, Minneng, Li, Guoliang, "Sulfur trioxide Emissions from Coal-Fired Power Plants in China and Implications on Future Control," *Fuel*, vol. 261, Feb 2020.

Conflict of Interest Statement:

The author declares that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest.