

Analisis Efisiensi Operasi *Boiler* Berdasarkan Produksi *Fly Ash* dan *Bottom Ash* Menggunakan Metode *Data Envelopment Analysis* Di PT. XYZ

Fakhriansyah Rosady^{1*}

¹Program Studi Teknik Industri/Jurusan Teknologi Industri Proses/Fakultas Rekayasa dan Teknologi Industri, Institut Teknologi Kalimantan

Email: 12231027@student.itk.ac.id*

Abstrak

***Penulis Koresponding**

DOI:

<http://dx.doi.org/10.35718/jinse ng.v3i1.8481975>

Received April 2026;

Received in revised form May 2026;

Accepted May 2026;

Kebutuhan energi listrik di Indonesia terus bertambah seiring dengan pertumbuhan sektor industri dan jumlah penduduk, sehingga pembangkit listrik tenaga uap berbasis batubara masih menjadi sumber utama penyediaan energi nasional. PT. XYZ adalah salah satu perusahaan pembangkit listrik tenaga uap yang dalam setiap periode operasinya menghasilkan *fly ash* dan *bottom ash* dalam jumlah yang tidak menentu. Jumlah produksi *fly ash* dan *bottom ash* yang tinggi menjadi tanda bahwa proses pembakaran pada boiler belum berjalan sebagaimana mestinya, sehingga pemanfaatan sumber daya seperti batubara dan energi belum mencapai kondisi yang semestinya. Meskipun studi mengenai efisiensi boiler sudah cukup banyak dilakukan, penelitian yang secara spesifik menjadikan produksi *fly ash* dan *bottom ash* sebagai variabel output dalam pengukuran efisiensi operasi boiler masih jarang ditemukan. Penelitian ini dilakukan untuk menganalisis tingkat efisiensi operasi boiler di PT. XYZ berdasarkan produksi *fly ash* dan *bottom ash* menggunakan metode *Data Envelopment Analysis* (DEA) dengan pendekatan *input-oriented* pada model *Constant Returns to Scale* (CRS). Analisis mencakup enam *Decision Making Unit* (DMU) yang mewakili periode Juli hingga Desember 2025. Hasil penelitian menunjukkan bahwa beberapa DMU belum mencapai kondisi efisien, dengan variabel beban boiler, jam operasional, tekanan uap utama, kadar abu batubara, dan kadar air batubara sebagai faktor yang paling berpengaruh terhadap ketidakefisienan. Pada bulan Juli diperlukan pengurangan beban boiler menjadi sekitar 229,184 ton dan kadar abu batubara menjadi sekitar 3,06%. Pada bulan September beban boiler disesuaikan menjadi sekitar 41,965 ton dan jam operasional menjadi 720 jam. Pada bulan Oktober tekanan uap utama diturunkan menjadi sekitar 46 bar dan kadar abu batubara menjadi sekitar 30,14%. Pada bulan November beban boiler dikurangi menjadi sekitar 43,866 ton dengan kadar abu dan kadar air batubara mendekati 0%. Pada bulan Agustus dan Desember tidak ditemukan nilai *slack* sehingga tidak diperlukan penyesuaian input pada kedua periode tersebut.

Kata kunci: *Data Envelopment Analysis* (DEA), *Constant Returns to Scale* (CRS), *Efisiensi*.

Abstract

The demand for electrical energy in Indonesia continues to increase along with the growth of the industrial sector and the population, making

coal-based steam power plants remain the main source of national energy supply. PT. XYZ is one of the steam power plant companies that generates unpredictable amounts of fly ash and bottom ash in each of its operational periods. A high production volume of fly ash and bottom ash indicates that the combustion process in the boiler is not functioning optimally, meaning that the utilization of resources such as coal and energy has not achieved its proper condition. Although studies on boiler efficiency have been widely conducted, research specifically utilizing fly ash and bottom ash production as output variables in measuring boiler operational efficiency is still rarely found. This study was conducted to analyze the operational efficiency level of the boiler at PT. XYZ based on fly ash and bottom ash production using the Data Envelopment Analysis (DEA) method with an input-oriented approach on the Constant Returns to Scale (CRS) model. The analysis covers six Decision Making Units (DMUs) representing the period from July to December 2025. The results show that several DMUs have not reached an efficient state, with variables such as boiler load, operational hours, main steam pressure, coal ash content, and coal moisture content being the most influential factors driving inefficiency. In July, it is required to reduce the boiler load to approximately 229.184 tons and the coal ash content to around 3.06%. In September, the boiler load should be adjusted to approximately 41.965 tons and operational hours to 720 hours. In October, the main steam pressure needs to be lowered to approximately 46 bar and the coal ash content to around 30.14%. In November, the boiler load must be reduced to approximately 43.866 tons, with both coal ash and moisture content brought down close to 0%. Meanwhile, in August and December, no slack values were found, indicating that no input adjustments are required for those two periods.

Keywords: Data Envelopment Analysis (DEA), Constant Returns to Scale (CRS), Efficiency

1. PENDAHULUAN

Kebutuhan energi listrik di Indonesia terus meningkat seiring dengan pertumbuhan industri, perkembangan ekonomi, serta bertambahnya jumlah penduduk. Salah satu sumber energi yang banyak digunakan untuk memenuhi kebutuhan tersebut adalah pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) yang memanfaatkan batubara sebagai bahan bakar utama. Pada sistem PLTU, energi panas yang dihasilkan dari pembakaran batubara di dalam *boiler* digunakan untuk menghasilkan uap bertekanan tinggi yang selanjutnya dimanfaatkan untuk memutar turbin dan generator sehingga menghasilkan energi listrik (Pambudi et al., 2023).

Kebutuhan energi listrik di Indonesia terus meningkat seiring pertumbuhan industri, ekonomi, dan jumlah penduduk, sehingga diperlukan sumber energi yang andal dan berkelanjutan. Dalam konteks ini, batubara masih menjadi pilihan utama karena ketersediaannya yang melimpah di dalam negeri serta kemampuannya memenuhi kebutuhan energi nasional dalam skala besar (Pahlevi et al., 2024).

Perancangan dan prinsip kerja boiler merupakan aspek penting dalam sistem PLTU karena berpengaruh langsung terhadap efisiensi pembangkitan energi. Dalam perancangannya, boiler mempertimbangkan sejumlah hal teknis seperti kapasitas produksi uap, tekanan kerja, jenis uap yang dibutuhkan, serta pemilihan material pipa agar panas dapat berpindah dengan baik dari sumber pembakaran ke fluida kerja, sehingga air dapat diubah menjadi uap jenuh maupun uap panas lanjut sesuai kebutuhan operasi (Purba, 2016). Mengingat Indonesia masih memiliki cadangan batubara yang besar dan terus mengandalkannya sebagai sumber energi listrik dalam jangka panjang (Sartika, 2018), maka perancangan boiler yang mampu menjaga kestabilan tekanan dan temperatur kerja menjadi faktor yang menentukan seberapa efisien proses konversi energi tersebut dapat berjalan.

Fly ash dan bottom ash tidak hanya dipandang sebagai limbah, tetapi juga berpotensi dimanfaatkan sebagai bahan alternatif dalam berbagai produk konstruksi. *Fly ash* memiliki sifat *pozolanic* sehingga dapat menggantikan sebagian penggunaan semen dalam campuran beton, sedangkan campuran *fly ash dan bottom ash* sudah banyak digunakan sebagai bahan baku batako, *paving block*, maupun material

timbunan, yang berarti pemanfaatan ini memberi nilai tambah ekonomis sekaligus menekan jumlah limbah yang harus dibuang ke lingkungan (Wahyu, 2024). Dengan kondisi tersebut, pengelolaan limbah hasil pembakaran pada PLTU perlu ditangani dengan baik agar potensi yang ada benar-benar dapat dimanfaatkan secara optimal.

Efisiensi pembakaran pada boiler sangat dipengaruhi oleh kualitas batubara, terutama kadar abu dan kadar air yang terkandung di dalamnya. Batubara dengan kadar air tinggi membutuhkan banyak energi panas hanya untuk menguapkan kandungan airnya, sehingga panas yang sampai ke fluida kerja menjadi lebih sedikit, sementara kadar abu yang tinggi memicu terbentuknya endapan pada permukaan pipa boiler yang lama kelamaan menghambat perpindahan panas, dan kedua kondisi ini secara bersamaan menurunkan nilai kalor efektif batubara serta membuat proses pembakaran tidak berjalan sebagaimana mestinya (Nasir, 2022), yang ujungnya membebani biaya operasional karena batubara yang dibutuhkan lebih banyak dan perawatan peralatan harus dilakukan lebih sering.

Selain aspek teknis, pengelolaan PLTU juga tidak bisa lepas dari aspek lingkungan dan ketentuan regulasi yang berlaku. PLTU berbasis batubara di Indonesia wajib memenuhi baku mutu emisi gas buang yang telah ditetapkan oleh Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, sekaligus mengikuti ketentuan pengelolaan limbah padat berupa fly ash dan bottom ash, di mana pemenuhan aturan ini bukan sekadar formalitas perizinan tetapi menjadi bagian yang tidak terpisahkan dari tata kelola operasional yang baik (Aditama, 2022), karena tanpa kepatuhan terhadap regulasi tersebut, izin operasional PLTU dapat terancam dan dampak lingkungan yang ditimbulkan sulit untuk dikendalikan.

Proses pembakaran batubara di dalam boiler tidak hanya menghasilkan energi panas, tetapi juga menyisakan residu berupa fly ash dan bottom ash atau yang biasa disebut FABA. Fly ash adalah partikel abu halus yang ikut terbawa aliran gas buang dan ditangkap oleh peralatan seperti electrostatic precipitator, sedangkan bottom ash berupa abu yang lebih kasar dan mengendap langsung di dasar ruang bakar, dan banyaknya FABA yang terbentuk sangat bergantung pada kualitas batubara yang dipakai, cara pembakaran yang diterapkan, serta bagaimana pengoperasian boiler diatur (Ardi et al., 2021), sehingga batubara berkualitas rendah dengan kadar abu tinggi dan proses pembakaran yang tidak sempurna akan menghasilkan FABA dalam jumlah besar dengan sisa karbon yang masih cukup tinggi, yang kemudian menentukan apakah FABA tersebut layak langsung dimanfaatkan atau perlu penanganan lebih lanjut sebelum digunakan maupun dibuang.

Produksi *fly ash* dan *bottom ash* yang tinggi dapat menunjukkan bahwa proses pembakaran belum berlangsung secara optimal. Kondisi ini dapat mempengaruhi efisiensi operasi *boiler* karena penggunaan bahan bakar tidak dimanfaatkan secara maksimal. Oleh karena itu, diperlukan analisis untuk mengetahui tingkat efisiensi operasi *boiler* dengan mempertimbangkan hubungan antara variabel *input* dan *output* yang terlibat dalam proses pembakaran.

Salah satu metode yang dapat digunakan untuk mengukur efisiensi relatif suatu sistem produksi adalah *Data Envelopment Analysis* (DEA). Metode ini merupakan teknik analisis non-parametrik yang digunakan untuk mengevaluasi kinerja suatu unit pengambilan keputusan atau *Decision Making Unit* (DMU) berdasarkan perbandingan antara berbagai variabel *input* dan *output*. DEA mampu menunjukkan tingkat efisiensi relatif serta memberikan informasi mengenai variabel yang perlu diperbaiki pada unit yang belum efisien.

Metode *Data Envelopment Analysis* (DEA) merupakan salah satu metode yang digunakan untuk mengukur efisiensi relatif suatu unit pengambilan keputusan atau *Decision Making Unit* (DMU) berdasarkan perbandingan antara input dan output (Rambe & Syahputra, 2017). DEA telah banyak diterapkan dalam berbagai bidang, termasuk sektor pelayanan dan produksi, karena mampu memberikan evaluasi kinerja secara komprehensif terhadap unit yang dianalisis (Suseno & Rahmawan, 2017).

Penggunaan metode DEA juga telah diterapkan dalam sektor pendidikan untuk mengukur efisiensi kinerja institusi, yang menunjukkan fleksibilitas metode ini dalam berbagai bidang analisis (Abdullah, 2020). Penerapan metode DEA dalam industri juga digunakan untuk meningkatkan efisiensi dan produktivitas, termasuk pada sistem produksi dan operasi mesin (Kurnia et al., 2015).

Penelitian terkait efisiensi boiler pada pembangkit listrik menunjukkan bahwa metode DEA efektif dalam mengidentifikasi faktor-faktor yang mempengaruhi efisiensi operasional serta memberikan rekomendasi perbaikan (Nainggolan et al., 2025).

PT. XYZ merupakan perusahaan pembangkit listrik tenaga uap yang berperan dalam menyediakan pasokan listrik bagi kawasan industri Kariangau dan sekitarnya. Dalam kegiatan operasionalnya, proses pembakaran batubara pada *boiler* menghasilkan *fly ash* dan *bottom ash* dengan jumlah yang bervariasi pada setiap periode operasi. Variasi tersebut dipengaruhi oleh kondisi operasi *boiler* serta karakteristik

bahan bakar yang digunakan.

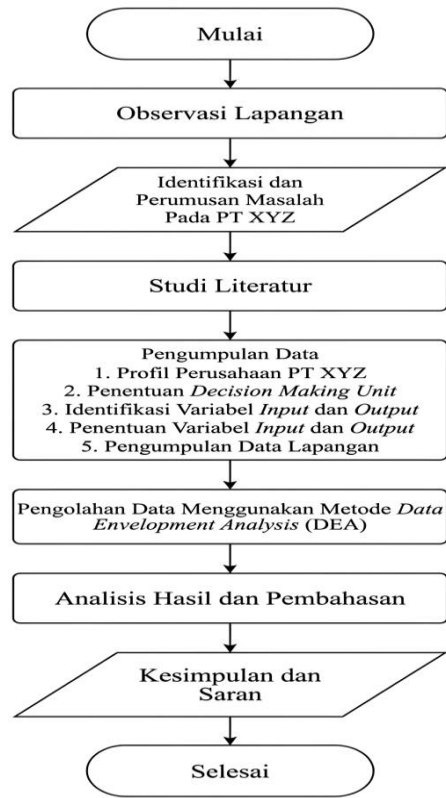
Berdasarkan kondisi tersebut, perlu dilakukan analisis efisiensi operasi *boiler* dengan menggunakan metode *Data Envelopment Analysis* (DEA). Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis tingkat efisiensi operasi *boiler* di PT. XYZ berdasarkan produksi *fly ash* dan *bottom ash* menggunakan pendekatan *input-oriented* pada model *Constant Returns to Scale* (CRS). Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan gambaran mengenai kondisi efisiensi operasi boiler serta menjadi bahan evaluasi dalam upaya meningkatkan kinerja operasional pembangkit listrik.

2. METODE

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah *Data Envelopment Analysis* (DEA), yaitu teknik analisis non-parametrik yang digunakan untuk mengukur efisiensi relatif suatu *Decision Making Unit* (DMU) berdasarkan perbandingan antara *input* dan *output* (Rambe & Syahputra, 2017). DEA merupakan metode yang banyak digunakan karena mampu mengakomodasi berbagai variabel input dan output tanpa memerlukan asumsi fungsi produksi tertentu, sehingga sangat sesuai untuk analisis efisiensi operasional (Fuad, 2023).

Pendekatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah *input-oriented*, yaitu pendekatan yang berfokus pada upaya meminimalkan penggunaan input tanpa mengurangi jumlah output yang dihasilkan (Kurnia et al., 2015). Model yang digunakan adalah *Constant Returns to Scale* (CRS), yang mengasumsikan bahwa perubahan *input* akan menghasilkan perubahan output secara proporsional (Rusydia & Hasib, 2020). Model DEA dengan pendekatan CRS banyak digunakan dalam berbagai sektor karena mampu memberikan gambaran efisiensi teknis secara menyeluruh terhadap unit yang dianalisis (Nainggolan et al., 2025). Penelitian ini menggunakan pendekatan DMU berdasarkan periode waktu, di mana setiap bulan operasi dianggap sebagai satu unit analisis yang berdiri sendiri (Abdullah, 2020). Pemilihan variabel *input* dan *output* dalam penelitian ini didasarkan pada faktor - faktor yang mempengaruhi kinerja sistem pembakaran serta efisiensi *boiler* (Nasir, 2022).

PT.XYZ merupakan perusahaan pembangkit listrik tenaga uap yang berperan dalam menyediakan pasokan listrik bagi kawasan industri Kariangau dan sekitarnya. Dalam kegiatan operasionalnya, proses pembakaran batubara pada boiler menghasilkan *fly ash* dan *bottom ash* dengan jumlah yang bervariasi pada setiap periode operasi. Variasi tersebut dipengaruhi oleh kondisi operasi *boiler* serta karakteristik bahan bakar yang digunakan. Berdasarkan kondisi tersebut, perlu dilakukan analisis efisiensi operasi *boiler* dengan menggunakan metode *Data Envelopment Analysis* (DEA). Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis tingkat efisiensi operasi *boiler* di PT.XYZ berdasarkan produksi *fly ash* dan *bottom ash* menggunakan pendekatan *input-oriented* pada model *Constant Returns to Scale* (CRS). Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan gambaran mengenai kondisi efisiensi operasi boiler serta menjadi bahan evaluasi dalam upaya meningkatkan kinerja operasional pembangkit listrik. Adapun diagram alir yang digunakan untuk menggambarkan langkah-langkah dari proses pada analisis ini adalah sebagai berikut :



Gambar 1. Diagram Alir

3. PEMBAHASAN

Menguraikan hasil pengolahan data menggunakan metode DEA dengan model CRS, mulai dari nilai *Efficiency Score* (θ) tiap DMU pada periode Juli hingga Desember 2025, kondisi *slack variable* pada variabel beban boiler, jam operasional, tekanan uap utama, kadar abu, dan kadar air batubara, hingga rekomendasi penyesuaian input agar operasi boiler di PT. XYZ dapat berjalan lebih efisien.

3.1 Rumus

Penulisan rumus model *Constant Return to Scale* (CRS) yang diolah dengan bantuan perangkat lunak LINGO sebagai berikut :

$$\text{Maximize} = 321,21U1 + 4,12U2$$

Subject to

$$229185V1 + 44553V2 + 47,5V3 + 47,5V4 + 902205V5 = 1$$

$$321,21U1 + 4,12U2 - 22,9185V1 - 44553V2 - 47,5V3 - 47,5V4 - 902205V5 \leq 0$$

$$304,9U1 + 0,45U2 - 21432V1 - 37190V2 - 46,7V3 + 46,7V4 - 856463V5 \leq 0$$

$$299,86U1 + 0U2 - 41966V1 - 720V2 - 47,8V3 - 48,8V4 - 842294V5 \leq 0$$

$$321,67U1 + 0U2 - 45762V1 - 744V2 - 46,5V3 - 47,5V4 - 903579V5 \leq 0$$

$$321,22U1 + 0U2 - 43866V1 - 720V2 - 47,5V3 - 48,5V4 - 877036V5 \leq 0$$

$$328,86U1 + 0,48U2 - 46761V1 - 744V2 - 47,4V3 - 48,4V4 - 923768V5 \leq 0$$

$$U1, U2, U3 \geq 0, V1, V2, V3, V4, V5, V6, V7, V8, V9 \geq 0$$

Model CRS (*Constant Return of Scale*) diolah menggunakan perangkat lunak LINGO. Dari hasil pengolahan tersebut diperoleh nilai *Efficiency Score* (θ) serta nilai *slack variable* pada masing-masing DMU, baik untuk variabel input maupun output. Nilai *Efficiency Score* (θ) diperoleh dari nilai *Objective Function Value*. Sementara itu, nilai *slack variable* dapat dilihat pada bagian *Reduced Cost* dalam software LINGO, yang selanjutnya dianalisis untuk menentukan tingkat efisiensi setiap DMU. *Slack input* (S_i) menunjukkan adanya kelebihan penggunaan input, yang berarti DMU masih dapat mengurangi penggunaan input tertentu tanpa menurunkan tingkat *output* yang dihasilkan. Sebaliknya, *slack output* (S_o) menunjukkan adanya kekurangan *output*, yang berarti DMU perlu meningkatkan output tertentu agar dapat mencapai kondisi efisien. $U1$ dan $U2$ merupakan bobot variabel output, dimana $U1$ mewakili produksi *fly ash* dan $U2$ mewakili produksi *bottom ash*, sedangkan $V1$ hingga $V5$ merupakan bobot variabel input yang secara berurutan mewakili beban boiler, jam operasional, tekanan uap utama,

temperatur uap utama, dan konsumsi batubara. Fungsi tujuan pada model ini adalah memaksimalkan nilai efisiensi DMU 1 yang mewakili periode Juli 2025, dihitung berdasarkan perkalian bobot output dengan nilai outputnya yaitu 321,21 ton untuk produksi *fly ash* dan 4,12 ton untuk produksi *bottom ash*. Kendala pertama merupakan persamaan normalisasi input DMU 1 yang ditetapkan sama dengan 1, dengan nilai beban boiler sebesar 229.185, jam operasional sebesar 44.553, tekanan uap utama sebesar 47,5, temperatur uap utama sebesar 47,5, dan konsumsi batubara sebesar 902.205. Kendala kedua hingga ketujuh menjamin bahwa nilai efisiensi masing-masing DMU dari periode Juli hingga Desember 2025 tidak melampaui angka 1 sesuai syarat model CRS. Seluruh nilai numerik dalam setiap kendala diambil dari data operasi aktual PT. XYZ pada Tabel 3, sementara bobot U dan V disyaratkan bernilai nol atau lebih agar solusi yang dihasilkan tetap valid secara matematis.

3.2 Tabel

Tabel 1. Indikator *Input* dan *Output*

| NO | INDIKATOR | VARIABEL | SATUAN | Kategori |
|----|------------------------|----------|---------|---------------|
| 1 | BEBAN BOILER | X1 | MW / % | <i>Input</i> |
| 2 | JAM OPERASIONAL BOILER | X2 | Jam | <i>Input</i> |
| 3 | TEKANAN UAP BOILER | X3 | Bar | <i>Input</i> |
| 4 | TEMPERATUR UAP UTAMA | X4 | °C | <i>Input</i> |
| 5 | KONSUMSI BATUBARA | X5 | Ton | <i>Input</i> |
| 6 | NILAI KALOR BATUBARA | X6 | Kkal/Kg | <i>Input</i> |
| 7 | KADAR ABU BATUBARA | X7 | % | <i>Input</i> |
| 8 | KADAR AIR BATUBARA | X8 | % | <i>Input</i> |
| 9 | PRODUKSI LISTRIK | X9 | MWH | <i>Input</i> |
| 10 | PRODUKSI FLY ASH | Y1 | Ton | <i>Output</i> |
| 11 | PRODUKSI BOTTOM ASH | Y2 | Ton | <i>Output</i> |

Tabel 1. Memuat variabel penelitian yang berkaitan dengan operasi *boiler* beserta satuan pengukurannya. Variabel tersebut meliputi kondisi operasi *boiler*, karakteristik batubara, dan hasil pembakaran. Variabel *input* terdiri atas beban *boiler*, jam operasional, tekanan uap, temperatur uap utama, konsumsi batubara, nilai kalor batubara, kadar abu batubara, kadar air batubara, dan produksi listrik. Variabel *output* meliputi produksi *fly ash*, dan produksi *bottom ash*.

Tabel 2. *Decision Making Unit* (DMU)

| NO | PROSES UNIT BOILER PER BULAN | DMU (<i>Decision Making Unit</i>) |
|----|------------------------------|-------------------------------------|
| 1 | JULI | DMU 1 |
| 2 | AGUSTUS | DMU 2 |
| 3 | SEPTEMBER | DMU 3 |
| 4 | OKTOBER | DMU 4 |
| 5 | NOVEMBER | DMU 5 |
| 6 | DESEMBER | DMU 6 |

Tabel 2. memperlihatkan penetapan *Decision Making Unit* (DMU) yang digunakan dalam analisis. Pada penelitian ini, DMU ditentukan berdasarkan periode operasi, di mana setiap bulan operasi unit *boiler* dianggap sebagai satu DMU yang terpisah. Dengan ketentuan tersebut, diperoleh 6 DMU, mulai dari DMU 1 untuk bulan Juli hingga DMU 6 untuk bulan Desember.

Tabel 3. Data Variabel *Input* dan *Output* Bulan Juli – Desember 2025

| INPUT | | | | | | | | | | OUTPUT | |
|-----------|-----------------------|------------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|---------------------------|
| DMU | Beban Boiler (MW / %) | Jam Operasional Boiler (Jam) | Tekanan Uap Boiler (Bar) | Temperatur Uap Utama (°C) | Konsumsi Batu Bara (Ton) | Nilai Kalor Batu Bara (Kkal/Kg) | Kadar Abu Batu Bara (%) | Kadar Air Batu Bara (%) | Produksi Listrik (MWH) | Produksi Fly Ash (Ton) | Produksi Bottom Ash (Ton) |
| JULI | 229185 | 44553 | 47,5 | 47,5 | 9,022,05 | 3,750,0 | 3,36 | 38,82 | 10,489,50 | 321,21 | 4,12 |
| AGUSTUS | 1432 | 37190 | 46,7 | 46,7 | 8,564,63 | 3,788,0 | 3,20 | 39,1 | 10,108,05 | 304,9 | 0,45 |
| SEPTEMBER | 41966 | 720 | 47,8 | 48,8 | 8,422,94 | 3,793,0 | 2,53 | 38,09 | 9,958,73 | 299,86 | 0 |
| OKTOBER | 45762 | 744 | 46,5 | 47,5 | 9,035,79 | 3,753,5 | 30,15 | 38,615 | 10,675,35 | 321,67 | 0 |
| NOVEMBER | 43866 | 720 | 47,5 | 48,5 | 8,770,36 | 0 | 0 | 0 | 10,384,61 | 312,22 | 0 |
| DESEMBER | 46761 | 744 | 47,4 | 48,4 | 9,237,68 | 3,741,5 | 33,35 | 38,93 | 10,714,73 | 328,86 | 0,48 |

Tabel 3. menunjukkan total data *input* dan *output* pada Efisiensi Operasi *Boiler* selama periode Juli hingga Desember tahun 2025 di PT. Kariangau Power.

Tabel 4. Hasil Perhitungan Model CRS

| DMU | <i>Efficiency Score</i> (θ) | Indikator | Keterangan | <i>Slack Variabel</i> |
|-----------|--------------------------------------|--------------|------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| JULI | 9.333 | $\theta > 1$ | Inefisien | $So_2 = 2.265227$ $Si_1 = 0.3128012 \times 10^{-5}$ $Si_7 = 0.2975977$ |
| AGUSTUS | 1 | $\theta = 1$ | Efisien | - |
| SEPTEMBER | 0.975 | $\theta < 1$ | Inefisien | $So_1 = 0.3251700 \times 10^{-2}$ $Si_1 = 0.2342681 \times 10^{-4}$ $Si_2 = 0.2343145 \times 10^{-4}$ |
| OKTOBER | 0.999 | $\theta < 1$ | Inefisien | $So_1 = 0.3105824 \times 10^{-2}$ $Si_3 = 0.2100322 \times 10^{-1}$ $Si_7 = 0.7744772 \times 10^{-3}$ |
| NOVEMBER | 0.972 | $\theta < 1$ | Inefisien | $So_1 = 0.3113228 \times 10^{-6}$ $Si_1 = 0.2279670 \times 10^{-4}$ $Si_7 = 0.1923612 \times 10^{-1}$ $Si_8 = 0.1020612 \times 10^{-1}$ |
| DESEMBER | 1 | $\theta = 1$ | Efisien | - |

Tabel 4. menyajikan hasil pengukuran efisiensi enam DMU pada periode Juli hingga Desember dengan metode *Constant Returns to Scale* (CRS) melalui pendekatan *input-oriented* dalam *Data Envelopment Analysis* (DEA). Pada bulan Juli diperoleh nilai *Efficiency Score* (θ) sebesar 9,333 ($\theta > 1$) sehingga dikategorikan belum efisien, dengan slack *output* produksi *bottom ash* sebesar 2,265227 serta slack *input* beban *boiler* sebesar $0,3128012 \times 10^{-5}$ dan kadar abu batubara sebesar 0,2975977. Bulan Agustus menunjukkan nilai θ sebesar 1 ($\theta = 1$) yang menandakan kondisi efisien tanpa slack variabel. Pada bulan September nilai θ sebesar 0,975 ($\theta < 1$) sehingga masih belum efisien, dengan slack *output* produksi *fly ash* sebesar $0,3251700 \times 10^{-2}$ serta slack *input* beban *boiler* sebesar $0,2342681 \times 10^{-4}$ dan jam operasional boiler sebesar $0,2343145 \times 10^{-4}$. Bulan Oktober memperoleh nilai θ sebesar 0,999 ($\theta < 1$) dan belum mencapai efisiensi, dengan slack *output* produksi *fly ash* sebesar $0,3105824 \times 10^{-2}$ serta slack *input*

tekanan uap utama sebesar $0,2100322 \times 10^{-1}$ dan kadar abu batubara sebesar $0,7744772 \times 10^{-3}$. Pada bulan November nilai θ sebesar 0,972 ($\theta < 1$) juga menunjukkan kondisi belum efisien, dengan slack output produksi *fly ash* sebesar 0.3113228×10^{-6} serta slack input beban boiler sebesar $0,2279670 \times 10^{-4}$, kadar abu batubara sebesar $0,1923612 \times 10^{-1}$, dan kadar air batubara sebesar $0,1020612 \times 10^{-1}$. Sementara itu, pada bulan Desember diperoleh nilai θ sebesar 1 ($\theta = 1$) yang menunjukkan bahwa DMU telah mencapai tingkat efisiensi sesuai asumsi CRS.

Tabel 5. Perbaikan *Input* Pada Bulan Juli - Desember

| NO | INDIKATOR | BULAN | NILAI AKTUAL | TARGET MODEL CRS | Improvement (% dari Nilai Aktual) |
|----|------------------------|-----------|--------------|------------------|-----------------------------------|
| 1 | BEBAN BOILER | Juli | 229.185 | 229.184 | 99.99% |
| 2 | KADAR ABU BATUBARA | Juli | 3.36 | 3.06 | 91.07% |
| 3 | BEBAN BOILER | September | 41.966 | 41.965 | 99.99% |
| 4 | JAM OPERASIONAL BOILER | September | 720 | 720 | 100% |
| 5 | TEKANAN UAP BOILER | Oktober | 46.5 | 46 | 99.78% |
| 6 | KADAR ABU BATUBARA | Oktober | 30.15 | 30.14 | 99.96% |
| 7 | BEBAN BOILER | November | 43.866 | 43.866 | 100% |
| 8 | KADAR ABU BATUBARA | November | 0 | 0 | 0% |
| 9 | KADAR AIR BATUBARA | November | 0 | 0 | 0% |

Tabel 5. menunjukkan hasil perbaikan input pada periode Juli hingga November berdasarkan target model DEA CRS untuk setiap indikator dan waktu pengamatan. Pada bulan Juli, beban *boiler* tercatat memiliki nilai aktual 229.185 dengan target 229.184 sehingga tingkat *improvement* mencapai 99,99%, sedangkan kadar abu batubara dari 3,36 menurun menjadi 3,06 dengan *improvement* sebesar 91,07%. Memasuki bulan September, beban *boiler* dengan nilai aktual 41.966 dan target 41.965 menunjukkan *improvement* 99,99%, sementara jam operasional *boiler* dari 720 dengan target yang sama menghasilkan *improvement* 100%. Pada bulan Oktober, tekanan uap *boiler* mengalami penyesuaian dari 46,5 menjadi 46 dengan *improvement* 99,78%, serta kadar abu batubara dari 30,15 menjadi 30,14 dengan *improvement* 99,96%. Selanjutnya pada bulan November, beban *boiler* memiliki nilai aktual dan target yang sama yaitu 43.866 sehingga *improvement* mencapai 100%, sedangkan kadar abu batubara dan kadar air batubara yang masing-masing bernilai 0 dengan target 0 menunjukkan *improvement* sebesar 0%.

4. DISKUSI

Hasil penelitian menunjukkan bahwa tingkat efisiensi operasi *boiler* di PT.XYZ belum sepenuhnya berada pada kondisi optimal. Variasi nilai efisiensi yang terjadi pada setiap periode pengamatan menunjukkan bahwa kinerja operasi *boiler* dipengaruhi oleh beberapa faktor operasional. Kualitas batubara yang digunakan merupakan salah satu faktor yang berpengaruh terhadap efisiensi pembakaran. Kandungan abu dan kadar air yang tinggi dapat menyebabkan proses pembakaran tidak berlangsung secara optimal sehingga meningkatkan jumlah residu pembakaran yang dihasilkan. Kondisi ini dapat mempengaruhi efisiensi energi yang dihasilkan oleh sistem *boiler*. Selain itu, pengaturan beban *boiler* dan jam operasional juga memiliki peran penting dalam menentukan tingkat efisiensi sistem pembakaran. Pengoperasian boiler yang tidak sesuai dengan kondisi optimal dapat menyebabkan penggunaan energi yang kurang efisien. Penerapan metode *Data Envelopment Analysis* dalam penelitian ini memberikan gambaran mengenai tingkat efisiensi relatif antar periode operasi. Metode ini juga memungkinkan identifikasi variabel *input* yang berkontribusi terhadap ketidakefisienan sehingga dapat dijadikan dasar dalam menentukan langkah perbaikan operasional. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi bahan evaluasi bagi perusahaan dalam meningkatkan efisiensi operasi *boiler*. Selain itu, penelitian ini juga dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan kajian mengenai analisis efisiensi pada sistem pembangkitan listrik berbasis batubara.

5. KESIMPULAN

Adapun kesimpulan yang didapatkan pada penelitian yang berjudul “Analisis Efisiensi Operasi *Boiler*

Berdasarkan Produksi *Fly Ash* dan *Bottom Ash* Menggunakan Metode *Data Envelopment Analysis* (DEA) Di PT.XYZ” sebagai berikut :

1. Indikator yang memengaruhi tingkat efisiensi proses efisiensi operasi *boiler* berdasarkan produksi *fly ash* dan *bottom ash* di PT.XYZ meliputi Beban *boiler*, jam operasional, tekanan uap utama, kadar abu batubara, dan kadar air batubara.
2. Berdasarkan hasil pengukuran efisiensi pada periode Juli hingga Desember, nilai *Efficiency Score* (θ) menunjukkan perbedaan pada setiap DMU. Pada bulan Juli diperoleh nilai efisiensi sebesar 0,332736, yang menunjukkan bahwa kondisi operasi pada periode tersebut belum efisien. Pada bulan Agustus, nilai efisiensi mencapai 1, sehingga dapat dikategorikan sebagai kondisi efisien. Selanjutnya pada bulan September nilai efisiensi tercatat sebesar 0,9750546, kemudian pada bulan Oktober sebesar 0,9990503, dan pada bulan November sebesar 0,9719818. Pada bulan Desember, nilai efisiensi kembali mencapai 1, yang menandakan bahwa operasi pada periode tersebut berada pada kondisi efisiensi optimal. Secara keseluruhan, nilai efisiensi pada periode Juli hingga Desember menunjukkan adanya variasi pada setiap bulan. Efisiensi penuh dengan nilai 1 terjadi pada bulan Agustus dan Desember, sedangkan pada bulan lainnya nilai efisiensi masih berada di bawah angka tersebut sehingga menunjukkan bahwa kinerja operasi pada periode tersebut belum sepenuhnya mencapai tingkat efisiensi maksimum.
3. Usulan perbaikan efisiensi pada variabel beban *boiler*, jam operasional, tekanan uap utama, kadar abu batubara, dan kadar air batubara di PT XYZ ditentukan berdasarkan nilai *slack variable* pada setiap DMU. Pada bulan Juli diperlukan pengurangan input pada variabel beban *boiler* sebesar $229.185 - 0.000003128012 \approx 229.184$ Ton dan kadar abu batubara sebesar $3.36 - 0.2975977 \approx 3.06\%$. Pada bulan September dilakukan penyesuaian input pada beban *boiler* sebesar $41.966 - 0.00002342681 \approx 41.965$ Ton dan jam operasional sebesar $720 - 0.00002343145 \approx 720$ Jam. Pada bulan Oktober diperlukan pengurangan input pada tekanan uap utama sebesar $46.5 - 0.02100322 \approx 46$ Bar dan kadar abu batubara sebesar $30.15 - 0.00002343145 \approx 30.14\%$. Selanjutnya pada bulan November dilakukan pengurangan input pada beban *boiler* sebesar $43.866 - 0.00002279670 \approx 43.866$ Ton, kadar abu batubara sebesar $0 - 0.01923612 \approx 0\%$, dan kadar air batubara sebesar $0 - 0.01020612 \approx 0\%$. Sementara itu, pada bulan Agustus dan Desember tidak terdapat nilai *slack variable*, sehingga tidak diperlukan penyesuaian input pada periode tersebut. Penyesuaian input ini dilakukan agar penggunaan sumber daya dalam proses operasi boiler dapat menjadi lebih optimal.

6. UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih kami sampaikan kepada PT.XYZ atas kesempatan yang diberikan sehingga penelitian ini dapat dilaksanakan dengan baik. Terima kasih telah memberikan bantuan, dukungan, dan arahan selama proses pengumpulan data hingga penyusunan artikel ini.

7. REFERENSI

- Abdullah, D., 2020. Penerapan metode *Data Envelopment Analysis* untuk pengukuran efisiensi kinerja pendidikan sekolah menengah atas negeri.
- Aditama, R., 2022. Kebijakan ketenagalistrikan di bidang perlindungan dan pengelolaan lingkungan hidup sejak berlakunya Undang-Undang Cipta Kerja (studi pada PLTU batubara Tarahan). Disertasi, Universitas Lampung.
- Ardi, R., Rustamaji, R.M. and Priadi, E., 2021. Sifat-sifat fisis campuran fly ash dan bottom ash (FABA) dengan tanah timbunan. *Jurnal Teknik Sipil*, 21(1), pp. 2–5.
- Fuad, L., 2023. Analisis efisiensi dengan metode *Data Envelopment Analysis* (DEA) pada lembaga amil zakat Muhammadiyah. *Jurnal Maneksi (Management Ekonomi dan Akuntansi)*, 12(2), pp. 246–252.
- Kurnia, A.D.P., Bahauddin, A. and Ekawati, R., 2015. Usulan peningkatan efisiensi dan produktivitas mesin boiler dengan metode *Data Envelopment Analysis* dan *Malmquist Productivity Index* di PT. X. *Jurnal Teknik Industri Untirta*, 3(3).
- Nainggolan, R., Ritonga, F.S., Juwita, E., Bangun, A.J. and Marbun, A.A.S., 2025. Analisis efisiensi boiler menggunakan bahan bakar biomassa di PLTU PT GIP Growth Asia. *SINERGI POLMED: Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, 6(2), pp. 70–77.
- Nasir, S., 2022. *Teori dan teknologi pemanfaatan batubara*. 2nd ed. Palembang: UPT Penerbit dan Percetakan Universitas Sriwijaya.
- Pahlevi, R., Thamrin, S., Ahmad, I. and Nugroho, F.B., 2024. Masa depan pemanfaatan batubara sebagai sumber energi di Indonesia. *Jurnal Energi Baru dan Terbarukan*, 5(2), pp. 50–60.

- Pambudi, A., Sukmana, I. and Risano, Y., 2023. Pengaruh nilai spesifik konsumsi bahan bakar (SFC) terhadap jumlah pemakaian batubara di PT Bukit Energi Servis Terpadu PLTU Peltar 2×8 MW. *Jurnal Profesi Insinyur Universitas Lampung*, 4(2), pp. 133–142.
- Purba, J., 2016. Perancangan boiler pipa api untuk perebusan bubur kedelai pada industri tahu kapasitas uap jenuh 160 kg/jam. Disertasi, Universitas Pasir Pengaraian.
- Rambe, I.H. and Syahputra, M.R., 2017. Aplikasi Data Envelopment Analysis (DEA) untuk pengukuran efisiensi aktivitas produksi. *Journal of Mathematics Education and Science*, 2(2), pp. 38–43.
- Rusydiana, A. and Hasib, F.F., 2020. Super efisiensi dan analisis sensitivitas DEA: aplikasi pada bank umum syariah di Indonesia. *Amwaluna: Jurnal Ekonomi dan Keuangan Syariah*, 4(1), pp. 41–55.
- Sartika, S., 2018. Estimasi pasokan batubara untuk PLTU rencana di Provinsi Kalimantan Barat. *Jurnal Inovtek Polbeng*, 8(2), pp. 279–284.
- Suseno, S. and Rahmawan, S., 2017. Analisis efisiensi kerja pelayanan pembayaran rekening air dengan pendekatan Data Envelopment Analysis (DEA). *Jurnal Teknologi*, 10(2), pp. 115–120.
- Wahyu, S., 2024. Pemanfaatan fly ash dan bottom ash (FABA) sebagai solusi inovasi pengolahan limbah dalam mendukung keberlangsungan UMKM dalam bidang pembuatan batako, paving blok, dan pengecoran. *Jurnal Bisnis dan Pembangunan*, 13(1), pp. 97–108.