

## Evaluasi Unjuk Kerja *Boiler*: Studi Kasus pada Pabrik *Pulp* dan Kertas PT. ABC

Fikri Fahlevi Nasution<sup>1</sup>, Nur Khotimah<sup>1\*</sup>, Tikkos Sihombing<sup>1</sup>, Awaludin Martin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Magister Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Riau

<sup>2</sup>Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Riau

Kampus Bina Widya KM. 12,5, Simpang Baru, Kec. Tampan, Kota Pekanbaru, Riau

\*Corresponding author: [nurkhotimah052@gmail.com](mailto:nurkhotimah052@gmail.com)

### Abstract

*In process industries or power generation, boilers are one of the first components to consume energy. Moreover, poor combustion, heat transfer fouling, and improper operation and maintenance lead to a gradual decrease in efficiency. In addition, poor fuel and water quality cause boiler performance to decrease. As a result, efficiency testing helps determine how far the boiler efficiency deviates from the best efficiency level. A complete energy audit of the boiler was conducted at PT. ABC Pulp and Paper Mill with ASME (American Society for Mechanical Engineers) power test code, PTC 4.1. Direct method is an input-output method, and Indirect method is a method of heat loss that occurs in the boiler. The direct method shows an efficiency of 84.46% and the indirect method shows an efficiency of 78.73%. Based on direct and indirect methods showing a difference of 5.73%, it is reported that the total heat loss is 21.26% where the highest is in the dry flue gas of 14.88%, namely the incoming heat energy is carried away with dry flue gas.*

**Keywords:** energy audit, boiler efficiency, direct method, indirect method

### Abstrak

Dalam industri proses atau pembangkit listrik, *boiler* adalah salah satu komponen pertama yang mengkonsumsi energi. Selain itu, pembakaran yang buruk, pengotoran perpindahan panas, dan pengoperasian dan pemeliharaan yang tidak tepat menyebabkan penurunan efisiensi secara bertahap. Selain itu, kualitas bahan bakar dan air yang buruk menyebabkan kinerja *boiler* menurun. Akibatnya, pengujian efisiensi membantu menentukan seberapa jauh efisiensi *boiler* menyimpang dari tingkat efisiensi terbaik. Audit energi lengkap *boiler* dilakukan di Pabrik *Pulp* dan Kertas PT ABC dengan kode uji daya ASME (*American Society for Mechanical Engineers*), PTC 4.1. Metode langsung (*Direct method*) adalah metode *input-output*, dan metode tidak langsung (*Indirect method*) adalah metode kehilangan panas yang terjadi pada *boiler*. Metode langsung menunjukkan efisiensi sebesar 84,46 % dan metode tidak langsung menunjukkan efisiensi sebesar 78,73%. Berdasarkan metode langsung dan tidak langsung menunjukkan perbedaan sebesar 5,73%, dilaporkan bahwa kehilangan panas total sebesar 21,26% dimana yang tertinggi terdapat pada *dry flue gas* sebesar 14,88 % yaitu energi panas yang masuk terbawa bersama gas buang kering.

**Kata kunci:** audit energi, efisiensi *boiler*, metode langsung, metode tidak langsung

## 1. Pendahuluan

Indonesia sebagai negara dengan keberagaman sumber daya alam, telah lama mengandalkan sumber energi fosil seperti batu bara, minyak bumi dan gas alam, sebagai sumber utama energi. Keberadaan sumber daya ini telah menjadi pendorong utama untuk pertumbuhan ekonomi dan pembangunan industri di Indonesia [1]. Berdasarkan laporan *Climate Transparency Report: Comparing G20 Climate Action 2022*, bauran energi Indonesia masih didominasi oleh bahan bakar fosil dengan

proporsinya mencapai 71%. Komponen bahan bakar fosil terbesar berasal dari minyak bumi yakni sebesar 30%, disusul batubara 29% dan gas fosil 11% [2].

Meskipun memiliki kekayaan sumber daya alam yang melimpah, Indonesia menghadapi tantangan signifikan dalam menjaga ketersediaan sumber energi fosil secara berkelanjutan [3]. Setiap tahun, terjadi penurunan yang signifikan dalam ketersediaan sumber energi fosil, terutama akibat eksploitasi yang tidak berkelanjutan dan peningkatan kebutuhan energi yang terus menerus [4].

Dewan Energi Nasional (DEN) melaporkan bahwa cadangan minyak bumi di Indonesia mencapai 4,2 miliar barel yang diperkirakan hanya mampu bertahan sampai 9 tahun ke depan [5]. Sementara berdasarkan data Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) mengungkapkan cadangan minyak bumi nasional sebesar 4,17 miliar barel dengan cadangan terbukti (proven) sebanyak 2,44 miliar barel dengan data cadangan yang belum terbukti sebesar 2,44 miliar barel [6].

Kementerian ESDM melaporkan umur cadangan gas bumi Indonesia tinggal 19,9 tahun. Asumsi tersebut tidak ada penemuan baru dengan tingkat produksi 6 *billion standard cubic feet per day* (bscfd) [6]. Sementara DEN melaporkan cadangan gas ditaksir hanya mampu bertahan hingga 18 tahun mendatang dengan cadangan gas 62,4 triliun kaki kubik (TCF) [5].

Sedangkan bahan bakar batubara memiliki sumber daya hingga 99,19 miliar ton dengan cadangan sebesar 35,02 miliar ton. Namun, jika merujuk pada data cadangan dari Kementerian ESDM, produksi batubara diasumsikan 700 juta ton per tahun, cadangan batubara baru akan habis 47-50 tahun ke depan [7].

Sisa cadangan sumber energi fosil yang semakin menipis menjadi perhatian serius. Penanganan yang tidak bijaksana terhadap sumber daya ini dapat mengancam keberlanjutan pasokan energi di masa depan. Pengelolaan yang cerdas dan efisien terhadap penggunaan energi menjadi krusial untuk menjaga ketersediaan energi dan meminimalkan dampak negatif terhadap lingkungan [8]. Oleh karena itu, semua pihak perlu melakukan upaya untuk meningkatkan efisiensi energi guna mengatasi permasalahan berkurangnya cadangan energi tersebut. Diperlukan upaya dari semua pihak untuk mengatasi permasalahan menipisnya cadangan energi tersebut [9]. Usaha dalam penghematan dalam penggunaan energi dengan cara konservasi energi. Konservasi energi adalah peningkatan efisiensi energi [10].

Dalam upaya meningkatkan efisiensi penggunaan energi di sektor industri, pemerintah telah menetapkan kebijakan konservasi energi sebagaimana diuraikan dalam Peraturan Pemerintah No Nomor 33 Tahun 2023. Kebijakan tersebut mengharuskan industri yang menggunakan sumber energi dan/atau energi lebih besar atau sama dengan 4000 setara ton minyak per tahun, wajib melaksanakan kegiatan konservasi energi melalui manajemen energi [11].

Salah satu industri yang merupakan konsumen energi yang signifikan adalah dari industri *Pulp* dan kertas. Dalam pabrik *Pulp* dan kertas ada sistem *boiler* yang menjadi komponen yang sangat penting, karena kinerja *boiler* berpengaruh terhadap keseluruhan sistem dari pabrik dan merupakan pengonsumsi energi terbesar. Evaluasi kinerja *boiler* menjadi perlu dilakukan untuk menilai sejauh mana efisiensi operasinya. Upaya konservasi energi pada *boiler* dianggap sebagai langkah penting dalam menghemat energi [12].

Audit energi adalah proses evaluasi pemanfaatan energi dan identifikasi peluang penghematan energi serta rekomendasi peningkatan efisiensi pada pengguna sumber energi dan pengguna energi dalam rangka konservasi energi [11]. Sistem *boiler* yang umumnya digunakan secara luas dalam industri untuk memproduksi uap dan energi panas [13], seringkali memiliki efisiensi yang dapat ditingkatkan.

Melalui audit energi, kita dapat mengidentifikasi potensi penghematan energi, meningkatkan efisiensi operasional *boiler*, dan pada gilirannya, mengurangi ketergantungan pada sumber energi fosil yang semakin langka. Audit ini bukan hanya investasi untuk efisiensi industri, tetapi juga langkah proaktif dalam menjaga keberlanjutan sumber daya energi nasional dan mengurangi dampak lingkungan negatif.

Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini melakukan studi kasus audit energi pada

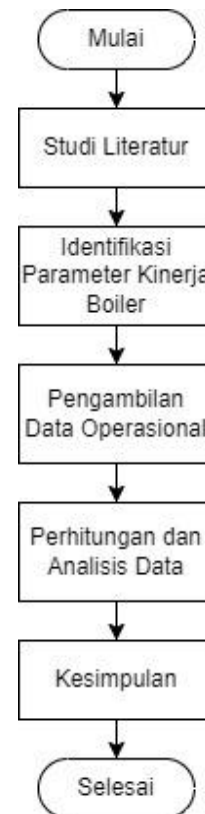
Pabrik *Pulp* dan Kertas PT. ABC untuk mengevaluasi kinerja dari sistem *boiler* dan menemukan potensi penghematan energinya.

## 2. Metode Penelitian

Penelitian dilakukan selama 1 (satu) bulan dari 25 November 2023 – 23 Desember 2023 di Industri *Pulp* dan Kertas PT. ABC. Sumber data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data dari PT. ABC. Data yang digunakan adalah jenis dan jumlah bahan bakar yang digunakan, tekanan, temperatur air umpan *boiler*, jumlah uap per jam, gas buang dan temperatur keluaran *boiler*.

Analisis efisiensi kinerja *boiler* atau audit sistem *boiler* memerlukan pendekatan metodologi yang terstruktur untuk memahami dan meningkatkan operasional perangkat tersebut. Tahapan awal melibatkan studi literatur untuk memperoleh pemahaman mendalam tentang teori dan konsep dasar terkait efisiensi kinerja *boiler*. Identifikasi parameter kinerja kritis, seperti efisiensi termal dan komponen kehilangan energi, menjadi langkah selanjutnya untuk memberikan kerangka kerja penelitian. Pemantauan operasional yang cermat, dengan merekam data berkala tentang suhu, tekanan, dan laju aliran bahan bakar, menjadi landasan analisis data yang mendalam.

Rekomendasi untuk meningkatkan efisiensi dibuat berdasarkan hasil analisis, yang kemudian divalidasi dan diverifikasi dengan data independen. Hasil penelitian ini tidak hanya memberikan gambaran lengkap tentang kinerja *boiler*, tetapi juga memberikan gambaran tentang langkah-langkah yang dapat dilakukan untuk meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan sistem *boiler* di masa depan. Diagram alir penelitian dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Perhitungan efisiensi *boiler* menggunakan dua metode yaitu metode langsung (*direct method*) dan metode tidak langsung (*indirect method*).

### 2.1 Direct Method

Metode langsung atau yang sering disebut dengan *direct method* adalah suatu metode perhitungan untuk mencari efisiensi sebuah *boiler* yang membandingkan antara energi yang terkandung pada bahan bakar *boiler* dengan energi yang terkandung pada *steam* yang dihasilkan. *Direct method* dapat dihitung menggunakan persamaan 1 [14]:

$$\eta = \frac{\text{Heat Output}}{\text{Heat Input}} = \frac{Q \times (H-h)}{q \times \text{GCV}} \quad (1)$$

dimana,

$Q$  = quantity of steam generated (kg/jam)

$q$  = quantity of fuel used (kg/jam)

GCV = Gross heating value of fuel (kJ/kg)

$H$  = Enthalpy of steam (kJ/kg)

$h$  = Enthalpy of feed water (kJ/kg)

## 2.2 Indirect Method

Metode tidak langsung atau yang sering disebut dengan metode *indirect method* adalah suatu metode perhitungan untuk mencari suatu efisiensi sebuah *boiler* dengan cara menghitung nilai panas yang hilang (*heat loss*) [14].

Metode tidak langsung menggunakan standar acuan untuk uji *boiler* yaitu *British Standard*, BS 645:1987 dan *USA standard ASME PT-4-1 Power Test Code Steam Generating Unit* [15]. Efisiensi dapat dihitung dengan mengurangi bagian kehilangan panas dari 100% seperti pada persamaan 2 [16]:

$$\eta = 100\% - (Ldfg + LH2 + Lmf + Lma + Lfa + Lba + LQ) \quad (2)$$

dimana,

Ldfg = Presentase kehilangan panas yang diakibatkan oleh gas buang yang kering (%)

LH2 = Persentase kehilangan panas karena penguapan air yang terbentuk karena adanya H2 dalam bahan bakar (%)

Lmf = Persentase kehilangan panas karena penguapan kadar air dalam bahan bakar (%)

Lma = Persentase kehilangan panas karena kadar air dalam udara (%)

Lfa = Persentase kehilangan panas karena bahan bakar yang tidak terbakar dalam abu terbang (%)

Lba = Persentase kehilangan panas karena bahan bakar yang tidak terbakar dalam abu bawah (%)

LQ = Persentase kehilangan panas karena radiasi dan kehilangan lain yang tidak terhitung (%)

Kehilangan energi dapat dibagi menjadi dua kategori yaitu, kehilangan yang tidak dapat dihindarkan dan kehilangan yang dapat dihindarkan. Salah satu cara untuk meningkatkan efisiensi energi adalah dengan melakukan audit energi. Salah satu kerugian *boiler* yang umum dapat dihindari atau dikurangi. Beberapa kehilangan panas pada *boiler* dapat dihitung menggunakan persamaan dibawah ini.

### 1. Heat loss due to dry flue gases

$$Ldfg = \frac{m \times Cp \times (Tf - Ta)}{GCV \text{ of fuel}} \times 100\% \quad (3)$$

### 2. Heat loss due to evaporation of water formed due to H2 in fuel

$$LH2 = \frac{9 \times H \times \{584 + Cp(Tf - Ta)\}}{GCV \text{ of fuel}} \times 100\% \quad (4)$$

### 3. Heat loss due to moisture present in the fuel

$$Lmf = \frac{M \times \{584 + Cp(Tf - Ta)\}}{GCV \text{ of fuel}} \times 100\% \quad (5)$$

### 4. Heat loss due to moisture present in the air

$$Lma = \frac{AAS \times \text{Specific Humidity of air} \times Cp(Tf - Ta)}{GCV \text{ of fuel}} \times 100\% \quad (6)$$

### 5. Heat loss due to unburnt in fly ash

$$Lfa = \frac{\text{ash} \times GCV \text{ fly ash}}{GCV \text{ of fuel}} \times 100\% \quad (7)$$

### 6. Heat loss due to unburnt in bottom ash

$$Lfa = \frac{\text{ash} \times GCV \text{ bottom ash}}{GCV \text{ of fuel}} \times 100\% \quad (8)$$

### 7. Heat loss due to radiation and convection

$$LQ = 0.548 \left[ \left( \frac{Tf}{55.5} \right)^4 - \left( \frac{Ta}{55.5} \right)^4 \right] + \left[ 1.957 \times (Ts - Ta)^{1.25} \times \sqrt{\frac{196.85 \times Vm + 68.9}{68.9}} \right] \quad (9)$$

$$LQ = \frac{L6 (W/m^2) \times 0.86 \times \text{Surface area of boiler}}{GCV \text{ of fuel} \times \text{fuel firing rate}} \quad (10)$$

## 2.3 Boiler Data Collection

Data lapangan yang diambil pada sistem *boiler* di Pabrik *Pulp* dan Kertas PT. ABC dapat dilihat pada Tabel 1 di bawah ini.

Tabel 1. Data Sistem *Boiler*

Load	%	B-MCR
Flow of superheated steam	t/h	670
Steam drum pressure	MPa	16,1
Superheated outlet pressure	MPa	13,92
Superheated steam temperature	°C	545
Exhaust Gas Temperature	°C	150
Excess Air at Furnace outlet		1,15
Fuel Consumption	t/h	181,55
Fly ash flow	t/h	21,04
Bottom ash flow	t/h	5,26

Analisis bahan bakar dilakukan untuk mengetahui komposisi kimia dan fisik bahan bakar (perbandingan batubara dan kulit kayu), dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Fuel analysis

Item	Unit	Coal 80 : Bark 20
C	%	27,74
H	%	5,072
O	%	10,682
N	%	0,564
S	%	0,806
A	%	17,672
Moisture content	%	37,464
Lower calorific value	kcal/kg	3115,4
Lower calorific value	kJ/kg	13043,4

### 3. Hasil dan Pembahasan

Penelitian terkait efisiensi sistem boiler telah dilakukan di beberapa industri atau pabrik. Analisis efisiensi boiler

berbahan bakar gas di PT. XYZ menggunakan metode langsung dan tidak langsung didapatkan nilai efisiensi boiler sebesar 73,78% dengan metode langsung, dan 73,37% dengan metode tidak langsung [15]. Analisis efisiensi energi pada boiler industri tipe firetube kapasitas 2 ton/jam dengan bahan bakar compressed natural gas (CNG) di PT.X didapatkan hasil perhitungan efisiensi dengan metode langsung sebesar 81,04%, sedangkan hasil perhitungan dengan metode tidak langsung sebesar 85,65% [14]. Penentuan efisiensi boiler dengan menggunakan metode langsung di PT X Lumajang didapatkan hasil perhitungan untuk nilai efisiensi boiler di PT X Lumajang dengan metode langsung sebesar 84,710% apabila produksi uap maksimal [17].

Berdasarkan perhitungan dan analisis data menunjukkan efisiensi boiler menggunakan metode tidak langsung lebih efisien daripada metode langsung. Selain itu, metode langsung tidak memberikan informasi tentang berbagai jenis kerugian yang dapat dipertanggungjawabkan untuk berbagai tingkat efisiensi. Metode tidak langsung memberikan hasil yang lebih akurat karena mengukur secara langsung parameter kinerja boiler. Selain itu metode tidak langsung menyajikan losses yang terjadi pada boiler. Losses yang terjadi dapat terdiri dari kerugian panas pada gas buang, kehilangan panas pada dinding boiler, kehilangan panas melalui pengendalian udara pembakaran, hingga penggunaan bahan bakar. Hasil didapatkan untuk nilai efisiensi boiler di PT. ABC dengan metode langsung efisiensi sebesar 84,46%, sementara itu dengan menggunakan metode tidak langsung efisiensi sebesar 78,73%. Heat losses pada boiler dapat dilihat pada Tabel 3.

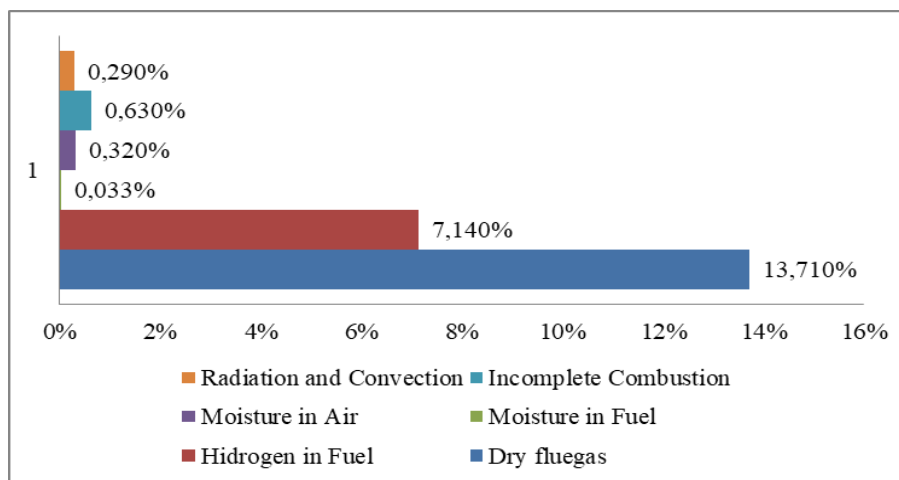
Tabel 3. Heat Losses Boiler

No	Heat loss	%
1	Heat loss due to dry flue gas	14,8842

2	Heat loss due to evaporating of water formed due to H <sub>2</sub> in fuel	2,7823
3	Heat loss due to evaporating of moisture present in fuel	3,0285
4	Heat loss due to moisture present in air	0,1512
5	Heat loss due to unburnt in fly ash	0,0010
6	Heat loss due to unburnt in bottom ash	0,4207
7	Heat loss due to radiation and convection	0,0002
	Total	21,2681
	Indirect Method	78,7319
	Direct Method	84,463

Berdasarkan Tabel 3, total *heat losses boiler* di PT. ABC sebesar 21,26% dengan *heat losses* paling besar pada *heat loss due to dry flue gas* (panas buang yang kering) sebesar 14,88%. Temperatur gas buang menunjukkan kandungan energi panasnya. Semakin tinggi temperatur gas buang (*flue gas*) berarti energi panas yang

dibuang tak termanfaatkan semakin besar pula. Suhu *flue gas* merupakan faktor utama penyebab kehilangan panas. Untuk itu perlu diupayakan mendinginkan suhu *flue gas*, dengan *recovery* panas sisa melalui suatu proses perpindahan panas. Untuk mendinginkan *flue gas*, harus ada fluida dingin yang dikontakkan (dipanaskan). Dengan proses ini suhu *flue gas* yang terlalu tinggi dapat diturunkan, yang sering disebut dengan efisiensi panas. Oleh karena itu, mengoptimalkan temperatur *flue gas* untuk meminimalkan kehilangan panas sangat penting. Temperatur *flue gas* yang diizinkan pada *power plant* hanya 120-130°C [18]. Beberapa penelitian terkait juga menunjukkan kehilangan panas terbesar terjadi pada *flue gas* [19], [20]. Pada saat pengoperasian temperatur *flue gas* pada *boiler* menunjukkan 150°C, hal ini menyebabkan *losses* tertinggi pada *dry flue gas*. *Heat losses boiler* pada PT. ABC ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Heat Losses Boiler

#### 4. Kesimpulan

Audit energi pada sistem *boiler* di Pabrik *Pulp* dan Kertas PT. ABC telah dilakukan. Berdasarkan hasil perhitungan untuk nilai efisiensi *boiler* di PT. ABC dengan metode langsung efisiensi sebesar 84,46%, sementara itu dengan menggunakan metode tidak langsung efisiensi sebesar 78,73%. Hasil nilai perhitungan efisiensi yang telah dilakukan

dari dua metode yaitu metode langsung dan tidak langsung memenuhi standar nilai efisiensi dari mesin *boiler* yaitu  $\geq 80\%$ . Hal ini dikarenakan boiler dapat dikatakan efisien apabila nilai efisiensinya berada pada range 70-90%.

#### Ucapan terimakasih

Kepada pihak Pabrik *Pulp* dan Kertas PT. ABC yang telah mengizinkan

dan membantu peneliti dalam melakukan audit energi pada sistem boiler.

## Referensi

- [1] A. Martin, D. R. Agusta, and N. Simangunsong, "Audit energi sistem tata cahaya dan tata udara lantai 2 & 3 pada bangunan gedung toko buku di Pekanbaru," *Turbo J. Progr. Stud. Tek. Mesin*, vol. 11, no. 2, 2022, doi: 10.24127/trb.v11i2.2133.
- [2] "CLIMATE TRANSPARENCY REPORT," *A G20 STOCKTAKE*, 2022. <https://www.climate-transparency.org/>.
- [3] A. K. N. Al Huda, "Transisi Energi Di Indonesia: Overview & Challenges," *Bul. Pertamina*, vol. 9, no. 2, p. 49, 2023.
- [4] A. Martin, R. Asrian, and J. Suriyadi, "Audit Energi Sistem Tata Cahaya dan Tata Udara pada Basement dan Lantai 1 Toko Buku Pekanbaru," *JTM-ITI (Jurnal Tek. Mesin ITI)*, vol. 6, no. 2, p. 98, 2022, doi: 10.31543/jtm.v6i2.762.
- [5] M. F. Riyandanu, "Umur Cadangan Minyak RI hanya Tersisa 9 Tahun, Gas Bumi 18 Tahun," *DEN*, 2022. [https://katadata.co.id/happyfajrian/berita/62d694400f2c3/den-umur-cadangan-minyak-ri-hanya-tersisa-9-tahun-gas-bumi-18-tahun#google\\_vignette](https://katadata.co.id/happyfajrian/berita/62d694400f2c3/den-umur-cadangan-minyak-ri-hanya-tersisa-9-tahun-gas-bumi-18-tahun#google_vignette).
- [6] ESDM, *STATISTIK Minyak dan Gas Bumi Semester I 2022*. Direktorat Jenderal Minyak dan Gas Bumi Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, 2022.
- [7] CNBC Indonesia, "Peran Batu Bara Perlu Ditinjau Lagi Pasca 2060, Ini Alasannya," 2023. <https://www.cnbcindonesia.com/news/20231215192514-4-497806/peran-batu-bara-perlu-ditinjau-lagi-pasca-2060-ini-alasannya>.
- [8] F. M. Noor and A. F. Rahman, "Studi Penerapan Integrasi Sumber Energi Baru Terbarukan dengan Smart grid dan Sistem Pengendalian SCADA," *Pros. Ind. Res. Work. Natl. Semin.*, vol. 14, no. 1, pp. 526–523, 2023.
- [9] F. Afif and A. Martin, "Tinjauan Potensi dan Kebijakan Energi Surya di Indonesia," *J. Engine Energi, Manufaktur, dan Mater.*, vol. 6, no. 1, pp. 43–52, 2022.
- [10] A. Martin, Z. Mahendra, Andika, and S. Ramahendra, "Audit Energi Sistem Tata Cahaya dan Tata Udara Rumah Makan di Kota Pekanbaru," *Proksima*, vol. 1, no. 1, pp. 8–12, 2023, doi: 10.31258/proksima.1.1.8-12.
- [11] PP, "Peraturan Pemerintah No. 33 Tahun 2023 Tentang Konservasi Energi," 2023, [Online]. Available: <https://peraturan.bpk.go.id/Details/252083/pp-no-33-tahun-2023>.
- [12] K. Hernawan, "Peluang Penghematan Energi Pada Boiler Di PT. Indo Bharat Rayon," *J. Energi*, vol. 10, no. 1, pp. 19–23, 2020.
- [13] D. Kurnia, "Perhitungan Neraca Energi Pada Unit Boiler Pada Proses Produksi Minyak Kelapa Sawit Di Pabrik Kelapa Sawit PT. XYZ," *J. Rekayasa, Teknol. Proses dan Sains Kim.*, vol. 2, no. 1, pp. 25–31, 2023.
- [14] A. Husen, "ANALISIS EFISIENSI ENERGI PADA BOILER INDUSTRI TIPE FIRETUBE KAPASITAS 2TON/JAM DENGAN BAHAN BAKAR COMPRESSED NATURAL GAS (CNG) DI PT.X," *Sainstech*, vol. 32, no. 2, 2022, doi: 10.37277/stch.v32i2.
- [15] G. P. A. Gumelar, M. N. Dewi, A. Miftah, W. Endranaka, and B. A. F. E. S. P, "Analisis Efisiensi Boiler Berbahan Bakar Gas di PT XYZ Menggunakan Metode Langsung dan Tidak Langsung," *Proceeding Technol. Renew. Energy Dev. Conf.* 2, vol. 2, 2022.
- [16] N. R. Iskandar, *Prosedur Standart dan Teknik Audit Energi di Industri*.

- Jakarta: Balai Besar Teknologi Energi (B2TE), 2015.
- [17] D. Aprilia and Hardjono, "PENENTUAN EFISIENSI BOILER DENGAN MENGGUNAKAN METODE LANGSUNG DI PT X LUMAJANG," *DISTILAT J. Teknol. Separasi*, vol. 7, no. 2, pp. 421–426, 2021, doi: 10.33795/distilat.v7i2.237.
- [18] M. Pronobis, *Modernization to reduce the flue gas loss*. 2020.
- [19] S. Desta and I. Ali, "Energy Audit of Boiler: Awash Melkassa Aluminum Sulphate and Sulphuric Acid Industry," *Academia.Edu*, vol. 17, no. 2, pp. 49–53, 2020, doi: 10.9790/1684-1702054953.
- [20] D. Hariyanto, *Prosedur Standard dan Teknik AUDIT ENERGI DI INDUSTRI*, no. 8. 2015.