

Pengaruh Pemakaian Jenis Bahan Bakar Terhadap Kinerja *Boiler* dengan Metode Langsung dan Tidak Langsung

Nahda Alifa Zahira Putri^{1,*}, Ika Yuliani¹, Sri Widarti¹

¹ Jurusan Teknik Konversi Energi, Politeknik Negeri Bandung

Jl. Gegerkalong Hilir, Desa Ciwaruga, Kec. Parongpong Kab. Bandung Barat – 40559

E-mail: nahda.alifa.tken21@polban.ac.id*

Abstract

Boilers produce steam by heating water using heat energy from burning fuel. This research analyzes the effect of fuel type on the performance of the 52-B-101C boiler at PT Kilang Pertamina Internasional RU VI Balongan. The performance parameters calculated are the evaporation ratio and efficiency using direct and indirect methods according to ASME Standard: PTC 4-1. The research results show that the use of 50% and 100% natural gas produces an evaporation ratio of 13,166 and 19,911, direct efficiency of 67.113% and 86.893%, and indirect efficiency of 87.699% and 85.758%. In conclusion, the use of 100% natural gas provides better boiler efficiency and performance. It is recommended to reduce the use of atmospheric residue and increase the use of natural gas with a hydrogen content that is not too high.

Keywords: boiler performance, fuel, evaporation ratio, direct method, indirect method

Abstrak

Boiler menghasilkan uap dengan memanaskan air menggunakan energi panas dari pembakaran bahan bakar. Penelitian ini menganalisis pengaruh jenis bahan bakar terhadap kinerja boiler 52-B-101C di PT Kilang Pertamina Internasional RU VI Balongan. Parameter kinerja yang dihitung adalah rasio evaporasi dan efisiensi dengan metode langsung dan tidak langsung sesuai ASME Standar: PTC 4-1. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan natural gas 50% dan 100% menghasilkan rasio evaporasi 13.166 dan 19.911, efisiensi langsung 67,113% dan 86,893%, serta efisiensi tidak langsung 87,699% dan 85,758%. Kesimpulannya, penggunaan natural gas 100% memberikan efisiensi dan kinerja boiler lebih baik. Disarankan untuk mengurangi penggunaan atmospheric residue dan meningkatkan penggunaan natural gas dengan kandungan hidrogen yang tidak terlalu tinggi.

Kata Kunci: Kinerja Boiler, Bahan Bakar, Rasio Evaporasi, Metode Langsung, Metode Tidak Langsung

1. Pendahuluan

PT Kilang Pertamina Internasional RU VI Balongan memanfaatkan energi bahan bakar dan listrik untuk operasional mesin-mesin produksi industri dan pencahayaan. Untuk memenuhi kebutuhan energi yang besar, dibentuk Unit Utilities yang memiliki 9 boiler (6 di Unit Existing dan 3 di Unit OSBL). Boiler ini menghasilkan steam dengan tekanan 43 kg/cm² dan temperatur 380°C, steam ini akan menggerakkan turbin sehingga dapat menghasilkan listrik karena poros turbin yang dihubungkan dengan generator. Listrik ini digunakan untuk operasional kilang dan kebutuhan lainnya.

Boiler yang digunakan adalah tipe water tube boiler dengan kapasitas steam rata-rata 115.000 kg/jam. Boiler ini menggunakan berbagai jenis bahan bakar, termasuk gas alam dan campuran gas alam dengan atmospheric residue. Sisa pembakaran bisa menyebabkan kerak yang menghambat transfer panas dan mempengaruhi kinerja boiler. Kinerja boiler diukur melalui rasio evaporasi dan efisiensi (dihitung dengan metode direct dan indirect).

Pemakaian dua jenis bahan bakar tersebut bervariasi tanpa ketentuan khusus. Analisis kebutuhan bahan bakar diperlukan untuk menentukan komposisi yang optimal guna meningkatkan efisiensi boiler, yang akan memberikan keuntungan ekonomi. Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari kinerja boiler dengan dua jenis bahan bakar untuk menghindari pemborosan energi.

Penelitian terdahulu yang relevan dengan judul penelitian ini mencakup sejumlah penelitian yang membahas mengenai efisiensi boiler. Kelana (2018), mengemukakan bahwa dengan penggunaan bahan bakar gas mempunyai nilai efisiensi yang lebih tinggi dibanding bahan bakar solar [1]. Gumelar (2022), melakukan analisis terhadap efisiensi boiler menggunakan dua metode yaitu metode langsung dan metode tidak langsung [2]. Dwi (2017), mengemukakan bahwa berdasarkan metode direct dan indirect faktor penyebab penurunan efisiensi boiler di karnakan kebocoran stem, rusaknya valve leak trough atau valve leak oug, kebocoran udara di liene air heater, basah nya bahan bakar (Batubara) [3]. Yusuf (2017), mengemukakan bahwa boiler

berbahan bakar LNG menghasilkan efisiensi yang lebih baik dari pada *boiler* berbahan bakar minyak SFO [4].

1.1 Boiler

Boiler adalah bejana tertutup dimana panas pembakaran dialirkan ke air sampai terbentuk air panas atau *steam*. Air panas atau *steam* pada tekanan tertentu kemudian digunakan untuk proses produksi [3].

Vessel terbuka yang menghasilkan uap bertekanan atmosfer tidak disebut sebagai *boiler*. Pada *furnace boiler*, energi kimia bahan bakar diubah menjadi energi panas. Panas ini dipindahkan ke air seefisien mungkin oleh *boiler*. Dengan demikian, fungsi utama *boiler* adalah untuk menghasilkan uap di atas tekanan atmosfer melalui penyerapan panas yang dihasilkan pada proses pembakaran [5].

Sistem *boiler* terdiri dari sistem air umpan, sistem *steam*, dan sistem bahan bakar. Sistem air umpan merupakan sistem penyedia air untuk *boiler* sesuai dengan kebutuhan *steam*. Sistem *steam* sebagai sistem untuk mengontrol serta mengumpulkan produksi *steam* dalam *boiler* itu sendiri. *Steam* akan dialirkan ke titik penggunaan *steam* melalui sistem pemipaan yang terdapat alat untuk memantau dan mengatur tekanan *steam*. Sistem bahan bakar merupakan semua komponen yang digunakan untuk menyediakan bahan bakar sebagai penghasil panas yang dibutuhkan. Komponen yang digunakan pada sistem bahan bakar ini berbeda beda, tergantung pada jenis bahan bakar yang digunakan [6].

1.2 Bahan Bakar

Bahan bakar adalah material yang dapat dibakar untuk menghasilkan kalor. Kalor ini digunakan secara langsung atau tidak langsung tergantung kebutuhan efisiensi dan ekonomi. Pada *boiler*, jenis bahan bakar yang digunakan bisa berupa cair, padat, atau gas.

1.2.1 Bahan Bakar Gas

Sebagai bahan bakar, gas alam sangat ideal karena umumnya bebas dari kandungan gas tidak terbakar atau residu padat sehingga efisiensi yang dihasilkannya pun akan relatif lebih besar [7].

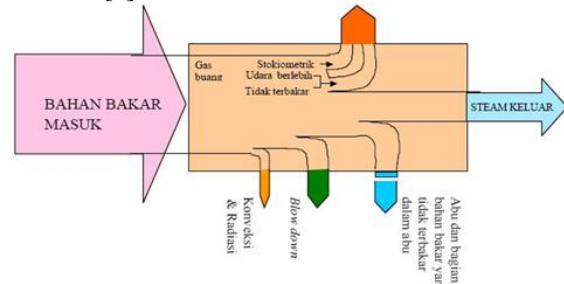
Natural gas adalah bahan bakar bersih yang paling umum digunakan dalam sistem *boiler*. *Natural gas* utamanya terdiri dari methane dan banyak ditemukan di Indonesia. Keuntungan penggunaannya adalah biaya lebih murah, lebih ringan dari udara, usia mesin lebih lama, perawatan lebih murah, dan ramah lingkungan.

1.2.2 Bahan Bakar Minyak

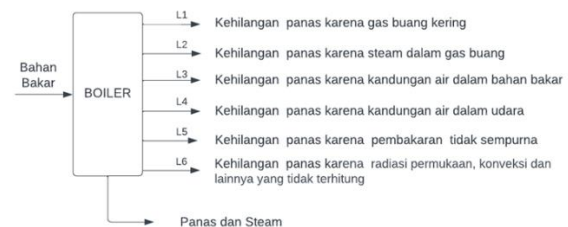
Bahan bakar cair dalam industri, transportasi, dan rumah tangga biasanya berasal dari fraksi minyak bumi, yang merupakan campuran hidrokarbon parafin, naphtena, olefin, dan aromatik. Minyak bumi (*crude oil*) dengan kandungan sulfur rendah dan titik didih rendah bisa langsung digunakan di mesin *boiler*, namun umumnya harus melalui proses fraksinasi dan destilasi terlebih dahulu.

1.3 Kinerja Boiler

Kinerja pada *boiler* memiliki parameter efisiensi *boiler* dan rasio evaporasi yang menurun terhadap waktu. Perihal tersebut berlangsung karena buruknya pada proses pembakaran yang dipengaruhi oleh buruknya mutu bahan bakar diberikan [8]. Neraca panas bisa menunjang dalam mengidentifikasi kehilangan panas yang dapat ataupun yang tidak bisa dihindari [7].



Gambar 1. Neraca Massa dan Energi Boiler



Gambar 2. Kehilangan Kalor Pada Boiler

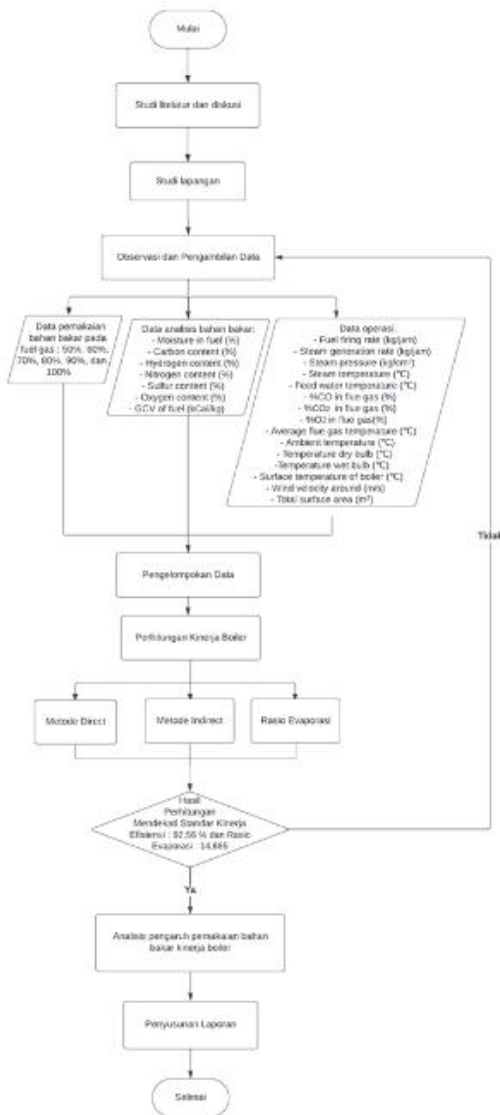
Gambar 2 diatas memberikan gambaran berbagai kehilangan yang terjadi untuk pembangkit uap. Neraca panas merupakan keseimbangan energi total yang masuk *boiler* terhadap yang meninggalkan *boiler* dalam bentuk berbeda [9].

2. Metodologi

2.1 Diagram Alir Penelitian

Metode penelitian yang dimaksud adalah pendekatan sistematis dari awal hingga penyelesaian penelitian dilakukan.

Penelitian ini melibatkan beberapa langkah utama. Studi literatur dilakukan untuk mencari informasi dan referensi mengenai topik yang berkaitan dengan tugas akhir, menggunakan sumber seperti buku, jurnal, laporan, dan wawancara dengan pihak terkait. Kemudian diskusi dilakukan dengan dosen pembimbing dan ahli materi dilakukan untuk mengatasi masalah selama penyusunan tugas akhir. Setelah itu, dilakukan studi lapangan dan pengambilan data dilakukan dengan mengumpulkan data langsung dari tempat penelitian, control room, situs Pertamina, dan referensi pendukung lainnya sesuai parameter yang diperlukan.



Gambar 3. Diagram Alir Penelitian

Data diklasifikasikan berdasarkan komposisi bahan bakar untuk memudahkan perhitungan serta memudahkan analisis yang akan dilakukan. Perhitungan kinerja boiler dilakukan dengan menghitung efisiensi menggunakan metode *direct* dan *indirect* serta rasio evaporasi dari data yang diperoleh. Terakhir, hasil perhitungan dianalisis untuk memastikan kesesuaian data. Jika hasilnya jauh dari standar atau abnormal, data akan diperiksa kembali untuk memastikan akurasi.

2.2 Objek Penelitian



Gambar 4. Boiler di RU VI Balongan

Boiler di Unit Utilities PT. Kilang Pertamina RU VI Balongan berfungsi sebagai penyedia steam untuk kebutuhan proses dan sebagai penggerak sudu-sudu turbin. Turbin ini terhubung dengan generator untuk menghasilkan listrik melalui perubahan energi mekanik menjadi energi listrik. Boiler ini menggunakan tipe water tube dengan sistem pembakaran menggunakan dua jenis bahan bakar: fuel gas (natural gas) dan campuran fuel gas (natural gas) dengan fuel oil (atmospheric residue).

Tabel 1. Spesifikasi Boiler di Pertamina RU VI Balongan

Rating and Data Desain		
1	Type	IHI – SC – 261 S
2	Evaporation (100 % M.C.R)	115.000 kg/jam
3	Design Press	55 kg/cm ²
4	Working Press (Superheater outlet)	43 kg/cm ²
5	Steam temp. (Superheater outlet)	380°C
6	Overall height	8,7 m
7	Overall width	6,6 m
8	Overall depth	12,2 m

2.3 Metode Perhitungan

2.3.1 Rasio Evaporasi

Rasio evaporasi boiler perbandingan uap yang dihasilkan dengan bahan bakar yang digunakan. Adapun untuk menghitung rasio evaporasi seperti berikut ini:

$$\text{Rasio Evaporasi} = \frac{\text{Quantity of steam generation}}{\text{Quantity of fuel generator}} \quad (1)$$

Keterangan:

Quantity of steam generation = massa steam [kg]

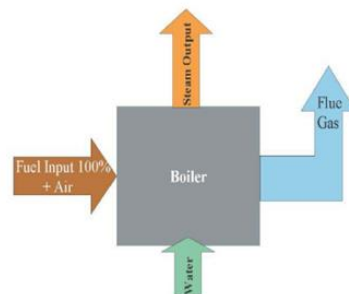
Quantity of fuel generator = massa konsumsi bahan bakar [kg]

2.3.2 Efisiensi

Pada dasarnya efisiensi boiler dapat diuji dengan 2 metode, yaitu metode langsung dan metode tidak langsung.

2.3.2.1 Efisiensi Metode Direct

Perhitungan efisiensi dengan metode langsung (*direct*) merupakan perhitungan efisiensi yang menggunakan perbandingan antara fluida kerja (air dan steam).



Gambar 5. Skematik Diagram Metode Direct

Keuntungan metode langsung:

- a. Evaluasi efisiensi boiler cepat.
- b. Perhitungan sederhana.

- c. Sedikit instrumen pemantauan.
 - d. Mudah membandingkan rasio penguapan
- Kekurangan:

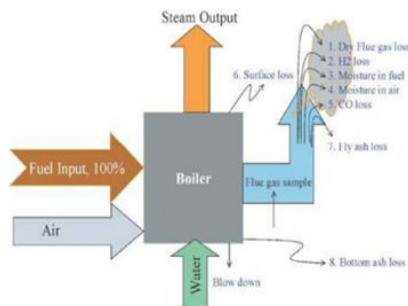
- a. Tidak mengidentifikasi penyebab rendahnya efisiensi.
 - b. Tidak menghitung semua kehilangan efisiensi.
- Adapun persamaan yang digunakan untuk menghitung efisiensi boiler dengan metode langsung (*direct*) sebagai berikut

$$\eta = \frac{Q \times (H - h)}{q \times GCV} \times 100\% \quad (2)$$

Dimana :

- η = Boiler efisiensi [%]
- Q = Jumlah uap yang dihasilkan [kg/jam]
- q = Jumlah bahan bakar yang digunakan [kg/jam]
- H = Entalpi uap [kKal/kg]
- h = Entalpi air umpan [kKal/kg]
- GCV = Gross Calorific Value dari bahan bakar [kKal/kg]

2.3.2.2 Efisiensi Metode Indirect



Gambar 6. Skematik Diagram Metode Indirect

Perhitungan Efisiensi dengan Metode Tidak Langsung (*Indirect*) merupakan solusi untuk menghitung potensi kehilangan panas pada boiler. Perhitungan efisiensi boiler yang menggunakan perbandingan antara kehilangan energi dengan energi yang masuk. Perhitungan menggunakan rumus berdasarkan ASME PTC:4.1 [10].

$$\eta = 100\% - (L1 + L2 + L3 + L4 + L5 + L6) \quad (3)$$

Dimana :

- η = Boiler efisiensi [%]
- L1 = Losses karena gas cerobong kering [%]
- L2 = Losses karena hydrogen dalam bahan bakar (H_2) [%]
- L3 = Losses karena kadar air dalam bahan bakar (H_2O) [%]
- L4 = Losses karena kelembaban di udara (H_2O) [%]
- L5 = Losses karena karbon monoksida (CO) [%]
- L6 = Losses karena radiasi permukaan, konveksi, dan lainnya [%]

Berikut beberapa tahapan awal yang perlu dihitung terlebih dahulu untuk membantu dalam proses perhitungan efisiensi boiler.

- A. Tahap 1 (Menghitung kebutuhan udara teoritis [TA])

$$\frac{(11,43 \times C) + \left\{34,8 \times \left(H_2 - \frac{O_2}{8}\right)\right\} + (4,35 \times S)}{100 \frac{kg}{kg} \text{ bahan bakar}} \quad (4)$$

- B. Tahap 2 (Menghitung kelebihan udara yang dipasok [EA])

$$\frac{O_2\%}{21 - O_2\%} \times 100 \quad (5)$$

- C. Tahap 3 (Menghitung masa udara sebenarnya yang dipasok/kg bahan bakar [AAS])

$$\left(1 + \frac{EA}{100}\right) \times \text{udara teoritis} \quad (6)$$

- D. Tahap 4 (Menentukan massa actual gas buang kering)

$$\begin{aligned} \text{Massa Gas Buang Kering (m)} &= \text{Massa CO}_2 \\ &+ \text{Massa kandungan N}_2 \text{ dalam bahan bakar} \\ &+ \text{Massa N}_2 \text{ dalam udara pembakaran yang di sediakan} \\ &+ \text{Massa oksigen dalam gas buang} \end{aligned} \quad (7)$$

- E. Tahap 5 (Menghitung semua losses yang terjadi)

- 1. Kehilangan panas karena gas cerobong

$$L1 = \frac{m \times C_p \times (T_f - T_a)}{GCV \text{ dari bahan bakar}} \times 100 \quad (8)$$

- 2. Kehilangan panas karena penguapan air yang terbentuk akibat hydrogen dalam bahan bakar

$$L2 = \frac{9 \times H_2 \times \{584 + C_p(T_f - T_a)\}}{GCV \text{ dari bahan bakar}} \times 100 \quad (9)$$

- 3. Kehilangan panas karena kandungan air dalam bahan bakar

$$L3 = \frac{M \times \{584 + C_p(T_f - T_a)\}}{GCV \text{ dari bahan bakar}} \times 100 \quad (10)$$

- 4. Kehilangan panas karena kandungan air dalam bahan bakar

$$L4 = \frac{AAS \times \text{Faktor kelembaban} \times C_p \times (T_f - T_a)}{GCV \text{ dari bahan bakar}} \times 100 \quad (11)$$

- 5. Kehilangan panas karena pembakaran tidak sempurna

$$L5 = \frac{\%CO \times C}{\%CO + \%CO_2} \times \frac{5744}{GCV \text{ bahan bakar}} \times 100 \quad (12)$$

- 6. Kehilangan panas karena radiasi dan konveksi

$$\begin{aligned} L6 = 0,548 \times &\left[\left(\frac{T_s}{55,55}\right)^4 - \left(\frac{T_a}{55,55}\right)^4 \right] \\ &+ 1,957 \times (T_s - T_a)^{1,25} \\ &\times \sqrt{\left[\frac{(196,85 \times V_m + 68,9)}{68,9} \right]} \end{aligned} \quad (13)$$

3. Hasil dan Pembahasan

Perhitungan yang dilakukan berupa sampel data pada tanggal 19 Maret 2023

3.1 Hasil perhitungan Rasio Evaporasi

Rasio evaporasi pada tanggal 19 Maret 2023 adalah 18,891

3.2 Hasil Perhitungan Efisiensi Direct

Efisiensi *direct* pada tanggal 19 Maret 2023 adalah 83,903%

3.3 Hasil Perhitungan Efisiensi Indirect

A. Tahap 1 (Menghitung kebutuhan udara teoritis [TA])

$$TA_{NG} = 16,793 \frac{kg}{kg} \text{ bahan bakar}$$

$$TA_{AR} = 12,531 \frac{kg}{kg} \text{ bahan bakar}$$

B. Tahap 2 (Menghitung kelebihan udara yang dipasok [EA])

$$EA = 7,593 \%$$

C. Tahap 3 (Menghitung masa udara sebenarnya yang dipasok/kg bahan bakar [AAS])

$$AAS_{NG} = 18,068 \frac{kg}{kg \text{ bahan bakar}}$$

$$AAS_{AR} = 13,482 \frac{kg}{kg \text{ bahan bakar}}$$

D. Tahap 4 (Menentukan massa actual gas buang kering)

$$m_{NG} = 17,027 \frac{kg}{kg} \text{ of gas}$$

$$m_{AR} = 13,765 \frac{kg}{kg} \text{ of gas}$$

E. Tahap 5 (Menghitung semua losses yang terjadi)

1. Kehilangan panas karena gas cerobong

$$L1_{NG} = 3,919 \% \quad L1_{AR} = 4,142 \%$$

2. Kehilangan panas karena penguapan air yang terbentuk akibat hydrogen dalam bahan bakar

$$L2_{NG} = 9,586 \% \quad L2_{AR} = 5,024 \%$$

3. Kehilangan panas karena kandungan air dalam bahan bakar

$$L3_{NG} = 0 \% \quad L3_{AR} = 1,322 \%$$

4. Kehilangan panas karena kandungan air dalam bahan bakar

$$L4_{NG} = 0,163 \% \quad L4_{AR} = 0,159 \%$$

5. Kehilangan panas karena pembakaran tidak sempurna

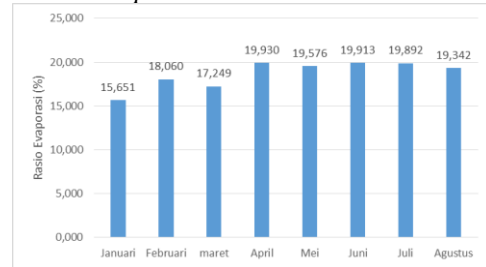
$$L2_{NG} = 0 \% \quad L2_{AR} = 0 \%$$

6. Kehilangan panas karena radiasi dan konveksi

$$L6 = 0,393 \%$$

Perbandingan nilai *Natural gas* (NG) dengan *Atmospheric Residue* (AR) di tanggal 19 Maret 2023 secara berturut-turut adalah 93% dan 7%. Maka nilai efisiensi *indirect* nya sebesar 85,15%.

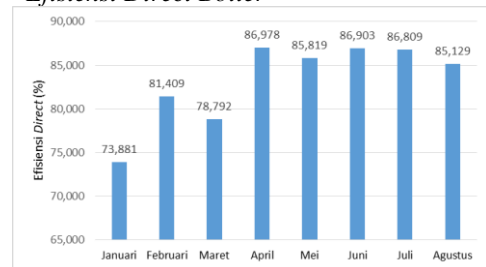
3.4 Perbandingan Persentase Bahan Bakar Dengan Rasio Evaporasi Boiler



Gambar 7. Rasio Evaporasi

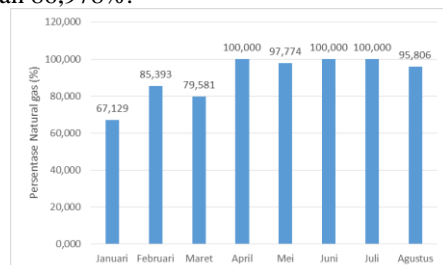
Gambar 7 diatas menunjukkan rasio evaporasi tertinggi pada April 2023, artinya perbandingan antara *steam flow* dan konsumsi bahan bakar lebih besar dibanding bulan lain. Rasio evaporasi terendah ada di Januari dengan nilai 15,651. Perbedaan ini bisa disebabkan oleh *steam flow* yang besar dengan konsumsi bahan bakar minimal, karena panas dari pembakaran bahan bakar digunakan secara optimal. Namun, rasio evaporasi ini tidak mempertimbangkan jenis atau nilai kalor bahan bakar yang digunakan. Analisis lebih lanjut pada efisiensi *boiler* 52-B-101C diperlukan untuk mengetahui pengaruh pemakaian jenis bahan bakar.

3.5 Perbandingan Persentase Bahan Bakar Dengan Efisiensi Direct Boiler



Gambar 8. Efisiensi Direct

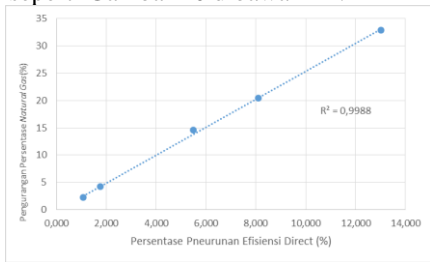
Gambar 8 menunjukkan efisiensi *boiler* 52-B-101C yang fluktuatif dari Januari hingga Agustus. Efisiensi ini dipengaruhi oleh faktor seperti suhu air umpan, suhu dan tekanan *steam*, serta jenis bahan bakar. Efisiensi terendah terjadi pada Januari 2023 dengan 73,957%, dan tertinggi pada April 2023 dengan 86,978%.



Gambar 9. Persentase Pemakaian *Natural Gas*

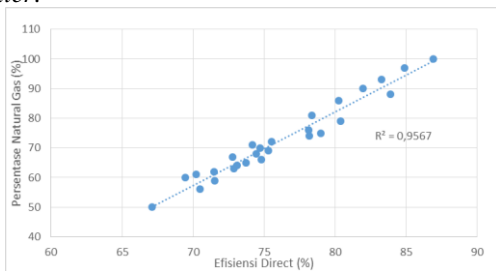
Gambar 9 menunjukkan bahwa pada Januari, *boiler* 52-B-101C dominan menggunakan bahan bakar campuran dengan komposisi *natural gas* rata-rata 67,126%. Persentase *natural gas* tertinggi terjadi pada April, Juni, dan Agustus 2023.

Gambar 8 dan Gambar 9 menunjukkan hubungan antara penggunaan *natural gas* dan efisiensi *Direct Boiler* seperti Gambar 10 dibawah ini.



Gambar 10. Persentase Pengurangan Pemakaian *Natural Gas* Terhadap Kenaikan Persentase Efisiensi

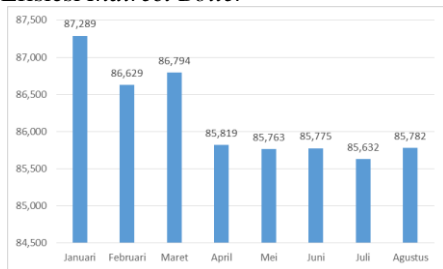
Gambar 10 menunjukkan hubungan linear antara persentase *natural gas* dan efisiensi *boiler*. Penurunan 20% *natural gas* mengurangi efisiensi sebesar 8,105%. Ini karena nilai kalor *natural gas* (14.090 kCal/kg) lebih tinggi daripada *atmospheric residue* (10.776 kCal/kg). Ini berarti *natural gas* dapat menghasilkan panas untuk memanaskan air umpan lebih banyak dibanding *atmospheric residue* dengan jumlah bahan bakar yang sama, sehingga lebih efisien dalam menghasilkan panas. Penggunaan lebih banyak *natural gas* akan meningkatkan efisiensi *direct boiler*. Gambar 11 dibawah ini juga memperkuat hubungan ini, menunjukkan bahwa pengurangan *natural gas* menurunkan efisiensi *boiler*.



Gambar 11. Persentase *Natural Gas* Terhadap Efisiensi *Direct*

Grafik menunjukkan efisiensi *direct* terbesar terjadi saat penggunaan *natural gas* 100% dengan nilai 86,893%, dan efisiensi terkecil 65,113% saat penggunaan *natural gas* 50%. Ini mendukung penjelasan diatas bahwa semakin tinggi persentase *natural gas*, semakin tinggi efisiensi *boiler*.

3.6 Perbandingan Persentase Bahan Bakar Dengan Efisiensi *Indirect Boiler*

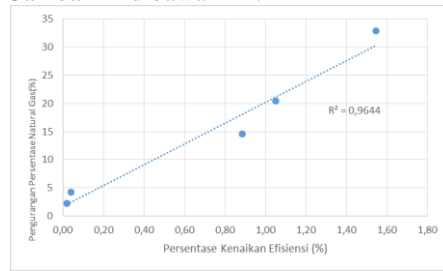


Gambar 12. Efisiensi *Indirect*

Gambar 12 menunjukkan efisiensi *indirect boiler* 52-B-101C yang fluktuatif setiap bulan, disebabkan oleh perbedaan komposisi bahan bakar. Efisiensi

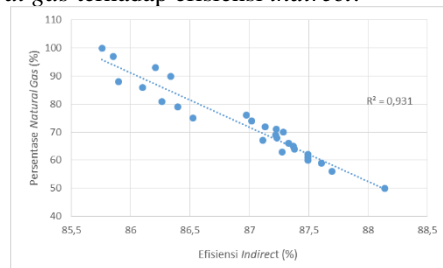
tertinggi terjadi pada Januari 2023 dengan 87,030%, sedangkan terendah pada Juli 2023 dengan 85,632%.

Jika melihat grafik pada Gambar 9, diperoleh hubungan antara persentase bahan bakar *natural gas* dengan efisiensi *indirect* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 12 dibawah ini.



Gambar 13. Persentase Pengurangan Pemakaian *Natural Gas* Terhadap Kenaikan Persentase Efisiensi *Indirect*

Gambar 13 menunjukkan bahwa pengurangan penggunaan *natural gas* meningkatkan efisiensi *indirect boiler*. Ketika *natural gas* dikurangi 20%, efisiensi *indirect* meningkat 1,05%. Hal ini terjadi karena perbedaan kandungan hidrogen antara *natural gas* dan *atmospheric residue*, yang menyebabkan lebih banyak kehilangan panas pada *natural gas*. Jadi, efisiensi *boiler* 52-B-101C lebih baik dengan bahan bakar campuran daripada hanya menggunakan *natural gas*. Gambar 14 dibawah ini memperkuat hubungan ini, menunjukkan pengaruh penggunaan *natural gas* terhadap efisiensi *indirect*.

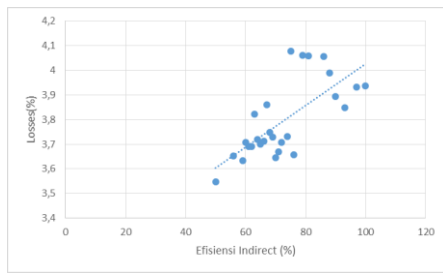


Gambar 14. Efisiensi *Indirect* Terhadap Persentase Pemakaian *Natural Gas*

Gambar 14 menunjukkan bahwa efisiensi *boiler* 52-B-101C meningkat dengan pengurangan komposisi *natural gas*. Penggunaan bahan bakar campuran dengan 50% *natural gas* lebih efisien dibandingkan dengan 100% *natural gas*. Pada komposisi 50% *natural gas*, efisiensi *indirect* mencapai 87,5837%, sedangkan pada 100% *natural gas* hanya 86,0487%. Perbedaan efisiensi ini disebabkan oleh kehilangan panas, yang dipengaruhi oleh temperatur gas buang, temperatur lingkungan, dan jenis bahan bakar yang digunakan.

3.6.1 Kehilangan Panas Karena Gas Cerobong

Kehilangan panas gas cerobong disebabkan oleh tingginya temperatur gas buang, yang menandakan perpindahan panas ke air umpan dalam pipa tidak maksimal. Boiler yang menggunakan *atmospheric residue* cenderung membentuk jelaga yang mengisolasi perpindahan panas, meningkatkan temperatur gas buang.



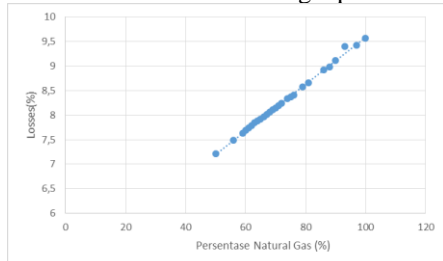
Gambar 15. Kehilangan Panas Karena Gas Cerobong Terhadap Persentase Pemakaian Bahan Bakar

Gambar 15 menunjukkan bahwa kehilangan panas tidak linear terhadap persentase bahan bakar, terutama karena pengaruh temperatur gas buang. Kehilangan panas terbesar terjadi saat bahan bakar 75%, dan terkecil saat *natural gas* 50%. Ini menunjukkan bahwa lebih banyak *atmospheric residue* mengurangi kehilangan panas dibandingkan lebih banyak *natural gas*, karena massa gas buang kering dari *natural gas* lebih besar.

Temperatur gas buang saat *natural gas* 50% adalah 155°C, lebih rendah dibandingkan 160°C saat *natural gas* 75%. Jadi, selain jenis bahan bakar, tingginya temperatur gas buang juga mempengaruhi kehilangan panas. Semakin tinggi temperatur gas buang, semakin besar kehilangan panasnya.

3.6.2 Kehilangan panas karena Hidrogen Dalam Bahan Bakar

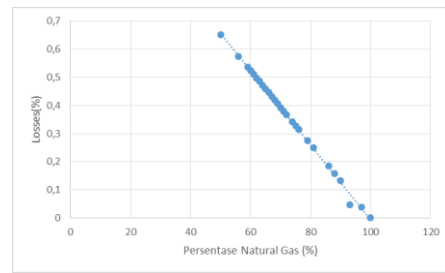
Kehilangan panas terbesar pada boiler 52-B-101C terjadi akibat hidrogen dalam bahan bakar bereaksi dengan oksigen saat terbakar, menghasilkan panas dan uap air. Panas yang dihasilkan sebagian diserap oleh uap air, mengurangi efisiensi kalor yang digunakan oleh boiler untuk menguapkan air umpan.



Gambar 16. Kehilangan Panas Karena Penguapan Air yang Terbentuk Akibat Hydrogen Dalam Bahan Bakar Terhadap Persentase Natural Gas

Gambar 16 menunjukkan bahwa kandungan hidrogen dalam bahan bakar menyebabkan kehilangan panas terbesar. Semakin besar penggunaan gas alam dengan hidrogen 23,18%, semakin besar kehilangan panas, terutama pada 100% gas alam. Sebaliknya, campuran 50% gas alam dengan *atmospheric residue* yang memiliki hidrogen 9,29% mengurangi kehilangan panas. Jadi, semakin tinggi kandungan hidrogen, semakin tinggi panas terbuang, yang menurunkan efisiensi boiler.

3.6.3 Kehilangan Panas Karena Moisture Dalam Bahan Bakar



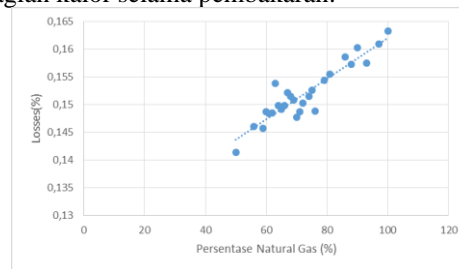
Gambar 17. Kehilangan Panas Kandungan Air Dalam Bahan Bakar Terhadap Persentase Pemakaian *Natural Gas*

Kehilangan panas ini terjadi karena moisture menyerap kalor dari pembakaran, mirip dengan kehilangan panas karena kandungan hidrogen dalam bahan bakar.

Gambar 17 menunjukkan bahwa penggunaan 100% *natural gas* tidak menyebabkan losses karena tidak mengandung air, sedangkan *atmospheric residue* dengan kandungan air 0,22% menyebabkan kehilangan panas. Semakin besar persentase *natural gas*, semakin kecil kehilangan panas. Jadi, semakin tinggi kandungan kelembaban dalam bahan bakar, semakin besar losses yang terjadi.

3.6.4 Kehilangan Panas Karena Kandungan Air Di Udara

Kehilangan panas akibat uap air dalam udara boiler kecil, namun tetap mengurangi kalor untuk memanaskan air umpan karena uap air menyerap sebagian kalor selama pembakaran.



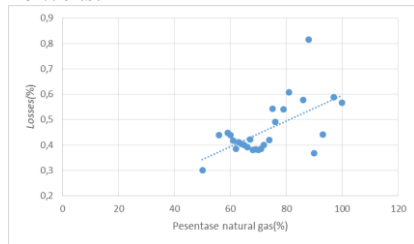
Gambar 18. Kehilangan Panas Kandungan Air Dalam Udara Terhadap Persentase Bahan Bakar Gas

Kehilangan panas disebabkan oleh uap air dalam udara pembakaran, dipengaruhi oleh faktor cuaca. Gambar 18 menunjukkan kerugian panas paling kecil saat menggunakan *natural gas* 50%, dan paling besar pada *natural gas* 100%. Ini menunjukkan semakin tinggi persentase penggunaan *natural gas*, semakin besar kerugiannya. Jenis bahan bakar juga mempengaruhi kehilangan panas karena setiap bahan bakar memiliki udara yang berbeda sesuai jenisnya.

3.6.5 Kehilangan Panas Karena Pembakaran Tidak Sempurna

Kehilangan panas karena pembakaran tidak sempurna dihitung sebesar 0%, menunjukkan tidak ada pengaruh terhadap efisiensi. Hal ini karena gas buang memiliki nilai CO 0%, menunjukkan bahwa semua karbon dalam bahan bakar telah terbakar habis. Baik *natural gas* maupun *atmospheric residue*, bahan bakar untuk boiler 52-B-101C ini, cenderung terbakar habis dan efisien.

3.6.6 Kehilangan Panas Karena Radiasi Dan Konveksi



Gambar 19. Kehilangan Panas Radiasi dan Konveksi Terhadap Persentase Bahan Bakar Gas

Gambar 19 menunjukkan bahwa penggunaan berbagai jenis bahan bakar memiliki sedikit pengaruh terhadap kehilangan panas, meskipun nilai GCV bahan bakar berbeda-beda. Ini disebabkan karena suhu pembakaran dan suhu permukaan *boiler* tetap stabil, kecuali ada perbaikan atau penambahan isolasi. Fluktuasi nilai yang terlihat disebabkan oleh perubahan suhu permukaan *boiler*, yang dipengaruhi oleh kecepatan angin. Ketika angin memiliki kecepatan yang tinggi, temperatur permukaan *boiler* akan menurun, namun bukan berarti losses yang dihasilkannya pun menurun, karena yang didinginkannya itu hanya bagian luarnya. Sehingga ketika kecepatan anginy tinggi, maka losses yang dihasilkannya pun tinggi, mengingat bahwa temperature permukaan yang terbaca telah didinginkan oleh angin yang berada disekitar *boiler*.

4. Simpulan

- Kinerja *boiler* dipengaruhi oleh dua parameter: rasio evaporasi dan efisiensi. Dengan meningkatnya penggunaan *natural gas* dari 50% hingga 100%, rata-rata rasio evaporasi *boiler* naik dari 13,166 menjadi 19,911, menunjukkan peningkatan sebesar 6,745. Efisiensi *boiler* dibagi berdasarkan metode yang digunakan, yaitu:
 - Efisiensi *boiler* dengan metode *direct* pada penggunaan *natural gas* 50% dan 100% adalah 67,113% dan 86,893%, meningkat 19,78%.
 - Efisiensi *boiler* dengan metode *indirect* pada penggunaan *natural gas* 50% dan 100% adalah 87,699% dan 85,758%, mengalami penurunan 1,941%.
- Rasio evaporasi meningkat seiring dengan persentase bahan bakar gas yang meningkat, namun penyebabnya tidak sepenuhnya jelas.
- Analisis efisiensi *boiler* mengidentifikasi dua jenis efisiensi:
 - Efisiensi *direct boiler* meningkat sejalan dengan persentase bahan bakar gas. Kalor yang lebih tinggi dari *natural gas* dibandingkan *atmospheric residue* menyebabkan rasio evaporasi dan efisiensi *direct* meningkat.
 - Efisiensi *indirect boiler* cenderung stabil namun sedikit menurun dengan peningkatan persentase gas, sekitar 1,941%. Hal ini disebabkan oleh losses yang lebih tinggi dari beberapa kandungan *natural gas* dibandingkan *atmospheric residue*, serta faktor-faktor lain yang mempengaruhi efisiensi tanpa terkait langsung dengan persentase bahan bakar.
- Komposisi bahan bakar yang dapat meningkatkan kinerja *boiler* jika dilihat dari perhitungan dan analisis yang telah dilakukan dapat direkomendasikan menggunakan 100% bahan bakar gas.

Daftar Pustaka

- A. Kelana, "Analisa Efisiensi Bahan Bakar Pada Boiler Pipa Api Kapasitas 1 Ton / Jam Menggunakan Bahan Bakar Solar Dan Gas Di Industri", 2018.
- G. P. A. Gumelar, M. N. Dewi, A. Miftah, W. Endranaka, and B. A. F. Eka, "Analisis Efisiensi Boiler Berbahan Bakar Gas di PT XYZ Menggunakan Metode Langsung dan Tidak Langsung," *Technol. Renew. Energy Dev.*, vol. 2, no. 1, pp. 22–28, 2022.
- S. W. Dwi, Hardiyansyah, and I. Muhammad, "Analisis Perhitungan Efisiensi Boiler Kapasitas 55 Ton / Jam di PT PT . PJB (Pembangkit Jawa Bali) PLTU Ketapang 2X10 MW," *J. Tekini*, vol. 1, no. 2, pp. 3–7, 2017.
- Y. Yusuf, "Analisa Perbandingan Pemakaian Bahan Bakar Solar Fuel Oil (Sfo) Dan Liquefied Natural gas (Lng) Terhadap Kinerja Boiler Di Unit Cold Rolling Mill (Crm) Di Pt X," *Tek. J. Sains dan Teknol.*, vol. 13, no. 2, p. 113, 2017, doi: 10.36055/tjst.v13i2.4016.
- C. T. Karaeng, I. Iswandi, F. Firman, and M. Nuzul, "Analisis Kinerja Boiler Pada PLTU Unit 1 PT. Semen Tonasa," *J. Tek. Mesin Sinergi*, vol. 11, no. 1, pp. 74–85, 2019.
- C. Aditya, "Efisiensi Boiler 31f-22 Dengan Metode Direct Dan Indirect. Jurusan Pengolahan Gas LNG Academy", 2014.
- H. Mulyawan, "Analisis Perbandingan Efisiensi Termal Steam Boiler Dengan Menggunakan Gas Alam dan Residu. Universitas Indonesia Skripsi Universitas Indonesia. Skripsi, 18, 39–40, 2009.
- S. Rijal, Masykur, "Analisa Kehilangan Panas Pada Boiler Type SFW 7000 Di PT. Socfindo Kebun Seunagan", vol. 7, pp. 129–136, 2022, [Online]. Available: <https://journal.uny.ac.id/index.php/dynamika/issue/view/2373>
- H. Hendaryati, "Analisis Efisiensi Termal Pada Ketel Uap Di Pabrik Gula Kebonagung Malang," *J. Gamma*, vol. 8, no. 1, pp. 148–153, 2012, [Online]. Available: <https://ejournal.umm.ac.id/index.php/gamma/article/view/1960>
- The American Society Of Mechanical Engineers, "Steam Generating Unit: Power Test Codes (ASME PTC 4.1). United Engineering Center", 1965.