

Evaluasi Kinerja Water Tube Boiler Berbahan Bakar Gas Alam Berdasarkan Variasi Jumlah Uap di Pabrik Farmasi

Tyas Rahmawati¹, Cecep Slamet Abadi^{1,2*}, dan Belyamin¹

¹Program Studi Teknologi Rekayasa Konversi Energi, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Jakarta, Jl. Prof. G. A. Siwabessy, Kampus UI, Depok, 16425

²Program Studi Teknologi Rekayasa Pembangkit Energi, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Jakarta, Jl. Prof. G. A. Siwabessy, Kampus UI, Depok, 16425

*Corresponding author E-mail address: cecep.selametabadi@mesin.pnj.ac.id

Abstrak

Industri farmasi memerlukan pasokan uap yang andal untuk pemanasan, sterilisasi, dan sanitasi, namun kebutuhan uap berfluktuasi mengikuti jadwal produksi sehingga water tube boiler beroperasi pada jumlah uap yang tidak tetap dan berpotensi menurunkan kinerja serta memboroskan bahan bakar. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan rentang variasi jumlah uap sebagai dasar evaluasi operasional dan pengambilan keputusan. Evaluasi menggunakan data operasi aktual selama 30 hari pada water tube boiler berbahan bakar gas alam di sebuah pabrik farmasi. Efisiensi dihitung dengan metode langsung mengacu pada ASME PTC 4.1, dilengkapi konsumsi bahan bakar spesifik (SFC), heat rate, kehilangan energi, analisis ketidakpastian Tipe A, serta uji hipotesis regresi linear. Hasil menunjukkan efisiensi 72,10–85,44% (rata-rata 77,19%) dan SFC 75,73–91,62 Nm³/ton (rata-rata 84,48 Nm³/ton) pada jumlah uap 3,07–13,06 ton/hari. Efisiensi meningkat dan SFC menurun seiring naiknya jumlah uap, keduanya signifikan pada $\alpha = 0,05$. Hasil penentuan variasi jumlah uap berada pada 11–13,07 ton/hari dengan efisiensi rata-rata 80,47% dan SFC 80,24 Nm³/ton. Menjaga operasi pada rentang tersebut berpotensi menghemat bahan bakar $\approx 4,24$ Nm³/ton atau setara $\approx$ Rp314,5 juta per tahun. Penelitian ini memberikan dasar kuantitatif bagi evaluasi operasional dan pengambilan keputusan untuk mengoperasikan boiler secara lebih efisien.

Kata-kata kunci: Boiler Pipa Air, Efisiensi, Konsumsi Bahan Bakar Spesifik, Variasi Jumlah uap

Abstract

The pharmaceutical industry requires a reliable steam supply for heating, sterilization, and sanitation. However, steam demand fluctuates with production schedules, causing the water tube boiler to operate under varying steam output. These unstable fluctuations can reduce boiler performance and increase fuel consumption. This study evaluates the performance of a natural gas-fired water tube boiler under different steam output using actual operational data collected over 30 days at a pharmaceutical plant. Efficiency was calculated using the direct method based on ASME PTC 4.1, along with Specific Fuel Consumption (SFC), heat rate, and energy loss. The relationship between steam output, efficiency, and SFC was analyzed using hypothesis testing. Results showed efficiency ranged from 72.10–85.44% with an average 77.19%, while SFC ranged from 75.73–91.62 Nm³/ton with an average 84.48 Nm³/ton at steam output of 3.07–13.06 tons/day. Efficiency increased while SFC decreased with increasing steam output, both significant at $\alpha = 0.05$. Maintaining a steam output of 11–13.07 tons/day, potentially saving 4.24 Nm³/ton or Rp314.5 million annually.

Keywords: Water Tube Boiler, Efficiency, Specific Fuel Consumption, Steam Output Variation

1. PENDAHULUAN

Industri farmasi membutuhkan uap untuk berbagai proses produksi seperti pemanasan, sterilisasi, dan sanitasi, sehingga keberadaan boiler menjadi penting untuk menunjang ketersediaan uap tersebut. Kebutuhan uap di pabrik farmasi tidak selalu sama setiap harinya karena mengikuti aktivitas produksi obat yang berlangsung secara bertahap sesuai jadwal produksi. Akibatnya, jumlah uap kerja *water tube boiler* berfluktuasi setiap hari. Hasil pengamatan di lapangan menunjukkan boiler berjalan pada rentang jumlah uap 3–13 ton per hari. Fluktuasi jumlah uap yang dapat memicu penurunan kinerja boiler sehingga mengakibatkan pemborosan penggunaan bahan bakar [1]. Oleh karena itu, menentukan rentang variasi jumlah uap diperlukan agar penurunan kinerja boiler dan pemborosan bahan bakar dapat diminimalisir.

Penelitian terdahulu terkait variasi jumlah uap telah dilakukan. Ariyandi dkk. (2024) menunjukkan bahwa perubahan jumlah uap operasi memengaruhi konsumsi bahan bakar dan efisiensi boiler, tetapi tidak menentukan rentang operasi yang . Penelitian Baringbing dan Sinaga (2023) berfokus pada efisiensi boiler tanpa mengaitkannya dengan SFC dan kehilangan energi. Sementara itu, kajian pada skala PLTU umumnya hanya berfokus pada pengaruh perubahan jumlah uap terhadap konservasi energi tanpa menghitung besarnya penghematan bahan bakar dan nilai ekonominya.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini difokuskan pada evaluasi kinerja *water tube boiler* berbahan bakar gas alam dan konsumsi bahan bakar spesifik berdasarkan jumlah uap operasi menggunakan data operasi aktual. Kinerja boiler dihitung dengan metode langsung (*direct method*), kemudian hubungan jumlah uap terhadap efisiensi dan konsumsi bahan bakar spesifik dimodelkan melalui analisis uji hipotesis. Hasil pemodelan tersebut digunakan untuk menentukan rentang variasi jumlah uap operasi sekaligus menghitung potensi penghematan bahan bakar dan nilai ekonominya. Penekanan utama penelitian ini adalah memberikan analisis kuantitatif yang dapat menjadi dasar evaluasi operasional dan pengambilan keputusan dalam mengoperasikan boiler secara efisien.

2. METODE PENELITIAN

Analisis dilakukan berdasarkan data operasi boiler yang meliputi laju aliran uap (*flow main steam*) sebagai representasi jumlah uap, tekanan uap, temperatur air umpan, debit bahan bakar, dan nilai kalor bahan bakar (*Gross Calorific Value*). Data tersebut diolah menggunakan metode langsung (*direct method*) untuk memperoleh efisiensi boiler, serta menghitung *Specific Fuel Consumption* (SFC), *Heat Rate*, dan *Qloss* sebagai parameter utama kinerja. Selanjutnya, data diuji menggunakan analisis ketidakpastian Tipe A dan dianalisis dengan regresi untuk menentukan hubungan antara jumlah uap operasi dan kinerja boiler serta mengidentifikasi variasi jumlah uap operasi dan potensi penghematan bahan bakar.

Pengumpulan dan Jenis Data yang Diambil

Penelitian ini merupakan penelitian kuantitatif dengan pendekatan perhitungan kinerja boiler menggunakan metode langsung (*direct method*) dan analisis statistik. Objek penelitian adalah satu unit *water tube boiler* berbahan bakar gas alam (MIURA GC-2000ZS, kapasitas uap maksimum 2.000 kg/h) yang beroperasi pada sistem utilitas pabrik farmasi. Data yang digunakan merupakan data sekunder berupa log sheet harian boiler selama 30 hari pengamatan, meliputi laju aliran uap (*flow main steam*) sebagai representasi jumlah uap, tekanan uap, temperatur air umpan, debit bahan bakar, dan nilai kalor bahan bakar (*Gross Calorific Value*). Sampel dipilih secara *purposive* agar merepresentasikan rentang jumlah uap operasi yang bervariasi.

Direct Method

Efisiensi dihitung dengan metode langsung berdasarkan perbandingan energi uap yang dihasilkan terhadap energi input bahan bakar:

$$\eta = \frac{Q \times (h_g - h_f)}{q \times GCV} \times 100 \quad (1)$$

Nilai Q = jumlah uap yang dihasilkan (kg), q = jumlah bahan bakar yang digunakan (Nm³), h_g = entalpi saturasi *steam* (kkal/kg), h_f = entalpi saturasi *feedwater* (kkal/kg), dan GCV = nilai kalor (kkal/Nm³).

Metode Specific Fuel Consumption (SFC)

SFC merupakan satuan indikator untuk menghitung seberapa hemat bahan bakar dalam menghasilkan satuan ton uap. Metode ini dapat dirumuskan sebagai berikut. [2]

$$SFC = \frac{q}{Q} \quad (2)$$

Metode Analisis Energi

Mengukur *heat rate* dan kehilangan energi, dimana *heat rate* untuk mengukur seberapa hemat energi yang dibutuhkan untuk menghasilkan satuan kg uap dan kehilangan energi untuk mengukur seberapa besar energi yang terbuang. Keduanya dapat dirumuskan sebagai berikut. [3]

$$HR = \frac{(q \times GCV)}{Q} \quad (3)$$

$$Q_{loss} = \frac{(q \times GCV) \times (100 - \eta)}{100} \quad (4)$$

Metode Ketidakpastiaan Tipe A

Keandalan data diuji melalui analisis ketidakpastiaan Tipe A yang dihitung dari standar deviasi rata-rata sampel, kemudian dikonversi menjadi ketidakpastiaan diperluas dengan faktor cakupan $k = 2$ (tingkat kepercayaan 95%). [4]

$$u_A = \frac{Sd}{\sqrt{n}} \quad (5)$$

$$U = k \times u_A \quad (6)$$

$$Y = \bar{x} \pm U \quad (7)$$

Metode Pengujian Hipotesis Variabel

Hubungan jumlah uap operasi terhadap efisiensi dan SFC dimodelkan dengan regresi linear sederhana dan dievaluasi menggunakan koefisien korelasi Pearson (r) serta koefisien determinasi (R^2). Signifikansi korelasi diuji dengan uji-t:

$$Y = a + b \times X \quad (8)$$

$$t = \frac{r\sqrt{(n-2)}}{\sqrt{(1-R^2)}} \quad (9)$$

Metode Penentuan Variasi Jumlah Uap

Penentuan kondisi diharuskan memiliki dua kriteria yaitu, efisiensi yang tinggi dan konsumsi bahan bakar yang hemat. Prosedur dalam menentukan kondisi sebagai berikut:

1. Memiliki tolak ukur efisiensi sesuai dengan acuan boiler berbahan bakar gas yang terpelihara baik $\geq 79\%$. [5]

2. Ambang minimum jumlah uap yang ditetapkan menggunakan model regresi dari jumlah uap terhadap efisiensi untuk mencapai tolak ukur pada poin 1.
3. Rentang jumlah uap yang diverifikasi harus memenuhi syarat dengan nilai rata-rata efisiensi dan SFC harus diatas nilai rata-rata kondisi aktual.
4. Rentang jumlah uap yang ditetapkan berdasarkan dari ambang minimum jumlah uap yang diprediksi dari poin 2 sampai jumlah uap maksimum.

Metode Potensi Penghematan Bahan Bakar dan Nilai Ekonomi

Hasil dari permodelan penentuan variasi jumlah uap (efisiensi rata-rata tertinggi dan SFC terendah). Selisih SFC antara kondisi aktual dan hasil dari penentuan variasi jumlah kemudian diterjemahkan menjadi potensi penghematan bahan bakar dan nilai ekonominya:

$$\text{Penghematan bahan bakar} = (SFC_{\text{aktual}} - SFC_{\text{optimal}}) \times Q_{\text{rata-rata}} \quad (10)$$

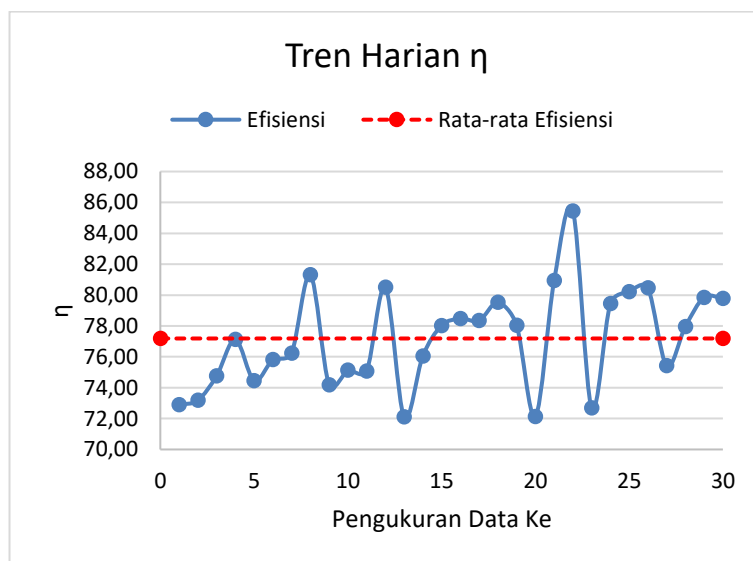
$$\text{Nilai penghematan biaya} = \text{Penghematan gas (Nm}^3\text{)} \times \text{Harga gas (Rp/Nm}^3\text{)} \quad (11)$$

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Efisiensi Boiler

Dengan menerapkan Persamaan 1 pada setiap data, sebagai contoh untuk data ke-1 diperoleh:

$$\eta = \frac{8500 \times (658,38 - 30)}{748,89 \times 9788} \times 100 = 72,89\%$$



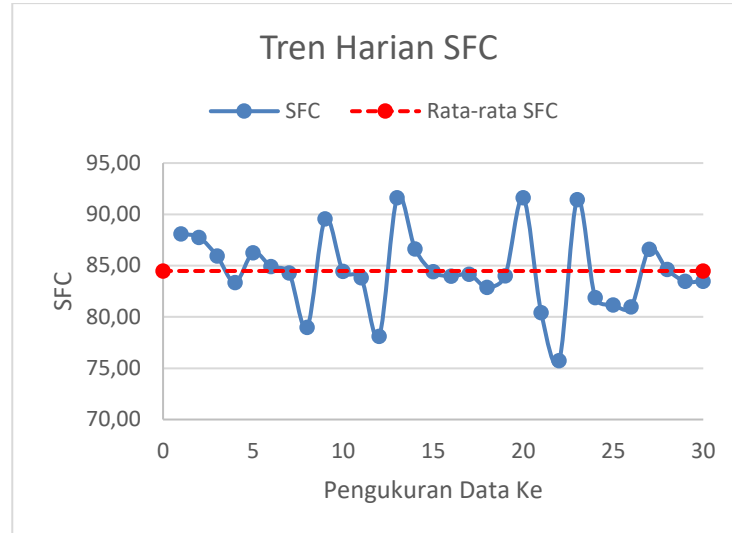
Gambar 1. Grafik tren harian efisiensi boiler

Data operasi harian boiler selama 30 hari pengamatan menunjukkan jumlah uap berfluktuasi pada rentang 3,07–13,06 ton/hari. Hasil perhitungan diterapkan pada seluruh data menunjukkan efisiensi berfluktuasi dari 72,10% (data ke-13) hingga 85,44% (data ke-22) dengan nilai rata-rata efisiensi 77,19%. Pola ini mengonfirmasi bahwa jumlah uap yang naik-turun memengaruhi nilai efisiensi boiler. Efisiensi rata-rata penelitian ini 77,19% sebanding dengan boiler gas pada penelitian lain sebesar 77,63% dan jauh diatas penelitian boiler bahan bakar padat pada sebesar 57-60%. [6][7]

Konsumsi Bahan Bakar Spesifik (SFC)

Dengan menerapkan Persamaan 2 pada setiap data, sebagai contoh untuk data ke-1 diperoleh:

$$SfC = \frac{748.89}{8.5} = 88.1 \text{ Nm}^3/\text{ton}$$



Gambar 2. Grafik tren harian konsumsi bahan bakar spesifik (SFC)

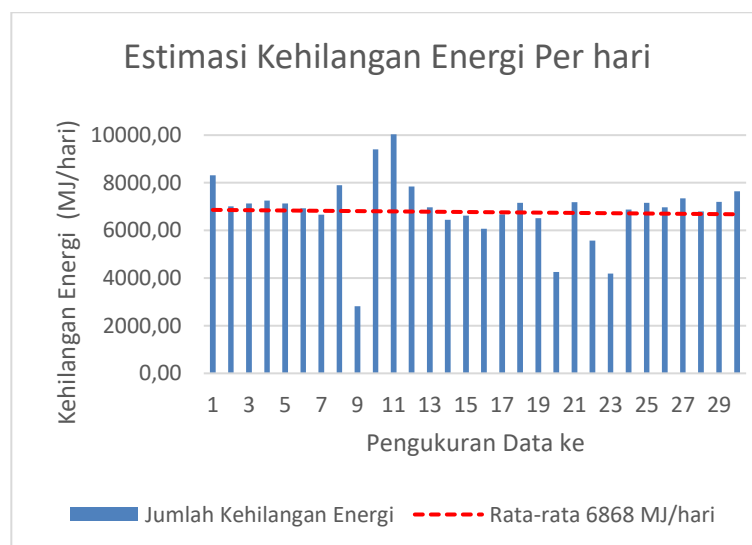
Hasil perhitungan seluruh data menunjukkan nilai SFC dalam 30 hari data pengamatan berada pada rentang 75,73-91,62 Nm³/ton dengan rata-rata 84,48 Nm³/ton. SFC paling hemat terjadi pada data ke-22 (75,73 Nm³/ton), sedangkan SFC paling boros pada data ke-20 (91,62 Nm³/ton). Pola ini menjelaskan bahwa semakin tinggi jumlah uap, semakin sedikit gas yang dibutuhkan untuk menghasilkan satu ton uap.

Analisis Energi (Heat Rate dan Kehilangan Energi)

Sebagai pendalaman analisis energi, dihitung *heat rate* dan kehilangan energi. Contoh data ke-1 menghasilkan:

$$\text{Heat Rate} = (748,89 \times 9788) / 8.500\text{kg uap} = 862.37 \text{ kkal/kg uap}$$

$$Q_{\text{loss}} = (748,93 \times 9788) \times (100 - 72,89) / 100 = 1.987.199.68 \text{ kkal} (\approx 8.320,03 \text{ MJ})$$



Gambar 3. Diagram kehilangan energi

Secara keseluruhan, *heat rate* terendah 733,9 kkal/kg terjadi pada data ke-22 (efisiensi tertinggi) dan tertinggi 872,7 kkal/kg pada data ke-13 (efisiensi terendah). Rata-rata kehilangan energi mencapai 22,81% dari input atau sekitar 6.868 MJ/hari. Boiler memiliki kerugian panas yang relatif tetap terutama kerugian radiasi dan konveksi dari permukaan boiler, penelitian lain memperlakukan rugi radiasi sebagai kerugian permukaan boiler yang menyatakan proporsi rugi-rugi panas termasuk radiasi meningkat pada beban parsial. [8]

Analisis Ketidakpastian (Uncertainty)

Analisis ini dilakukan untuk menguji kelayakan data dari penyimpangan acak yang ekstrim.

Tabel 1. Ringkasan ketidakpastian variabel kinerja (n = 30)

Variabel	Rata-rata	Std. Deviasi	Ketidakpastian U (k=2)	Hasil akhir ($\bar{x} \pm U$)
Jumlah uap Q (ton/hari)	9,11	2,43	0,89	$9,11 \pm 0,89$
Efisiensi η (%)	77,19	3,24	1,18	$77,19 \pm 1,18$
SFC (Nm ³ /ton)	84,48	3,78	1,38	$84,48 \pm 1,38$

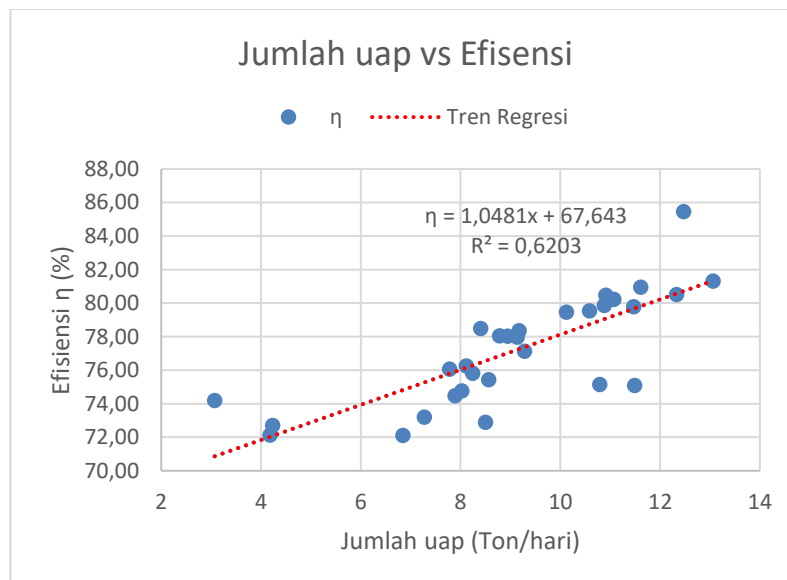
Nilai ketidakpastian diperluas yang relatif kecil menunjukkan bahwa pengambilan 30 sampel telah memenuhi standar pengulangan data yang baik, sehingga data dinyatakan valid dan layak digunakan sebagai landasan analisis termodinamika sistem.

Uji Hipotesis Hubungan Antar Variabel

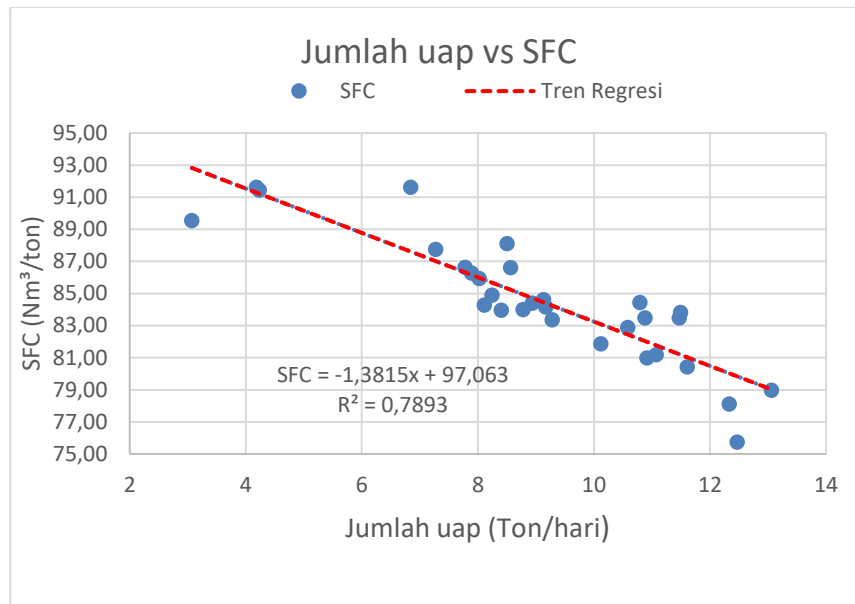
Hubungan jumlah uap terhadap efisiensi dan SFC dimodelkan dengan regresi linear sederhana.

Tabel 2. Hasil analisis regresi sederhana

Hubungan	r	R ²	a (konstanta)	b (slope)
Jumlah uap vs Efisiensi	0,7876	0,6203	67,643	1,0481
Jumlah uap vs SFC	-0,8884	0,7893	97,063	-1,3815



Gambar 4. Grafik tren perbandingan jumlah uap terhadap efisiensi



Gambar 5. Grafik tren perbandingan jumlah uap terhadap SFC

Model regresi yang diperoleh adalah $\eta = 67,643 + 1,0481 \times Q$ untuk efisiensi dan $SFC = 97,063 - 1,3815 \times Q$ untuk konsumsi bahan bakar spesifik. Setiap kenaikan jumlah uap 1 ton/hari meningkatkan efisiensi sekitar 1,05% dan menurunkan SFC sekitar 1,38 Nm³/ton. Nilai R² menunjukkan jumlah uap mampu menjelaskan 62% keragaman efisiensi dan 79% keragaman SFC, sisanya dipengaruhi faktor lain seperti kestabilan pembakaran dan rasio udara–bahan bakar.

Uji signifikansi (uji-t) dilakukan pada $n = 30$, $df = 28$, dan $\alpha = 0,05$ dengan $t_{tabel} \pm 2,048$. Untuk hubungan jumlah uap vs efisiensi diperoleh $t_{hitung} = 6,763 > 2,048$, sehingga H1 diterima: jumlah uap berpengaruh positif signifikan terhadap efisiensi. Untuk hubungan jumlah uap vs SFC diperoleh $t_{hitung} = -10,241 < -2,048$, sehingga H2 diterima: jumlah uap berpengaruh negatif signifikan terhadap SFC.

Penentuan Variasi Jumlah Uap

Penentuan variasi jumlah uap didasarkan pada kriteria nilai rata-rata efisiensi dan rata-rata SFC di atas kondisi aktual secara bersamaan. Dengan tolak ukur efisiensi terpelihara $\geq 79\%$, persamaan regresi efisiensi memprediksi ambang jumlah uap minimum, hasil yang didapat sekitar 11 ton/hari (η prediksi = 79,17%). Verifikasi pada kumpulan hari dengan jumlah uap ≥ 11 ton/hari menghasilkan kriteria efisiensi rata-rata tinggi dan SFC rata-rata rendah, sebagaimana disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil penentuan kondisi jumlah uap

Data	Jumlah uap Q (ton/hari)	Efisiensi η (%)	SFC (Nm ³ /ton)
8	13,06	81,31	78,97
11	11,49	75,07	83,82
12	12,33	80,50	78,11
21	11,61	80,93	80,43
22	12,47	85,44	75,73
25	11,07	80,23	81,18
30	11,47	79,78	83,47
Rata-rata	11,93	80,47	80,24

Ketika fluktuasi boiler dijaga pada variasi jumlah uap tinggi dengan rentang minimum 11-13,07 ton/hari, rata-rata efisiensi meningkat menjadi 80,47% dan SFC turun menjadi 80,24 Nm³/ton. Jumlah uap tinggi juga

membuat boiler bekerja mendekati titik desainnya yang menyebabkan pembakaran lebih stabil, campuran udara-bahan bakar lebih tepat, dan udara berlebih lebih terkendali sehingga panas yang terbuang lewat gas buang berkurang.[9] Akibatnya, konsumsi bahan bakar spesifik dan *heat rate* menurun seiring kenaikan jumlah uap. [10] Karena itu kinerja terbaik dicapai pada jumlah uap tinggi yang stabil, bukan pada jumlah uap rendah atau yang naik-turun.

Potensi Penghematan Bahan Bakar dan Ekonomi

Selisih SFC antara kondisi aktual (84,48 Nm³/ton) dan hasil dari penentuan variasi jumlah uap (80,24 Nm³/ton) penghematan yang dapat diraih sebesar 4,24 Nm³/ton ($\approx 5,02\%$). Pada produksi uap rata-rata 9,11 ton/hari, penghematan setara $\approx 38,6$ Nm³ gas per hari. Dengan harga gas Rp24.690 per Nm³ (acuan PGN, Mei 2026), nilai penghematan ekonomi diestimasikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Estimasi penghematan bahan bakar dan nilai ekonomi (harga gas Rp24.690/Nm³)

Basis waktu	Penghematan gas (Nm ³)	Nilai penghematan (Rp)
Per hari	$\approx 38,6$	≈ 953.000
Per bulan (30 hari)	≈ 1.158	$\approx 28.600.000$
Per tahun (330 hari)	≈ 12.737	$\approx 314.500.000$

Dengan demikian dengan menjaga operasi pada rentang variasi jumlah uap 11-13,07 ton/hari potensi penghematan sekitar Rp953 ribu per hari, Rp28,6 juta per bulan, atau $\approx$ Rp314,5 juta per tahun ($\approx 5\%$ dari total biaya bahan bakar gas) tanpa investasi besar. Dengan menjaga rentang variasi jumlah di angka minimum 11 ton/hari sampai 13,07 ton/hari penghematan dapat dilakukan dan konsumsi bahan bakar spesifik (SFC) dapat menurun, hal tersebut juga dapat ditingkatkan terutama dengan menjaga operasi pada jumlah uap tinggi yang stabil, mengoptimasi rasio udara–bahan bakar pada *burner*, serta mempertimbangkan pemasangan *economizer* untuk memanfaatkan panas gas buang. [10]

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah didapatkan, maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Rentang variasi jumlah uap dalam penelitian ini terjadi di rentang jumlah uap tinggi 11-13,07 ton/hari. Dalam kondisi ini rata-rata efisiensi dapat meningkat menjadi 80,47% dan konsumsi bahan bakar spesifik (SFC) dapat turun menjadi 80,24 Nm³/ton.
2. Potensi penghematan bahan bakar yang didapat mencapai 4,24 Nm³/ton dengan rata-rata produksi uap 9,11 ton/hari, asumsi potensi penghematan ekonomi yang didapat mencapai Rp953 ribu per hari dengan nilai penghematan sebesar 38,6 Nm³/hari. Dalam asumsi penghematan sebulan sebesar Rp28,6 juta dan setahun sebesar 314,5 juta (asumsi 330 hari operasi).

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Dosen Pembimbing serta Pembimbing Industri yang telah memberikan bimbingan, masukan, dan saran yang membangun, dan kepada seluruh pihak yang terlibat dalam penyusunan tugas akhir ini.

REFERENSI

- [1] M. R. Zulmi, D. Suanggana and D. M. Kurniawati, “ANALISIS EFISIENSI ENERGI, EFISIENSI EKSERGI, DAN LAJU KERUSAKAN EKSERGI PADA KOMPONEN MESIN PLTU MUARA JAWA DENGAN VARIASI PEMBEBANAN,” vol. 22, no. 1, pp. 1–12, 2021.
- [2] C. Hidayatullah, J. T. Energi, F. T. Kimia, and P. N. Sriwijaya, “Penentuan specific fuel consumption (SFC) dan efisiensi termal boiler produksi superheated steam pada water tube boiler ditinjau dari rasio udara bahan bakar solar,” vol. 26, no. 3, pp. 304–310, 2024.
- [3] A. Pambudi, I. Kukmana, and Y. E. Risano, “Pengaruh Nilai Spesifik Konsumsi Bahan Bakar (SFC) Terhadap Jumlah Pemakaian Batubara Di PT Bukit Energi Servis Terpadu PLTU Peltar 2x8 MW,” vol. 4, no. 2, 2023.
- [4] JCGM, “Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement,”

- no. September, 2008.
- [5] N. S. Laila *et al.*, “Efisiensi Termal Ruang Bakar Water Tube Boiler Ditinjau dari Pengaruh Rasio Udara Bahan Bakar Solar dan Gas pada Produksi Superheated Steam,” vol. 26, no. 3, pp. 298–303, 2024.
 - [6] A. Aditya, D. Dicky, and W. Sonden, “Perbandingan Efisiensi pada Boiler II TWA PPSDM Migas Menggunakan Metode Langsung dan Tidak Langsung Periode Bulan Maret 2023,” no. November, 2023.
 - [7] M. H. Baringbing, M. H. Baringbing, F. Teknik, U. Diponegoro, F. Teknik, and U. Diponegoro, “ANALISIS EFISIENSI WATER TUBE BOILER MENGGUNAKAN METODE LANGSUNG,” vol. 11, no. 2, pp. 49–68, 2023.
 - [8] P. Rasworo, “Analisis efisiensi boiler CFB 2x60 MW PLTU PT X unit 2 dengan metode direct dan indirect,” vol. 1, no. 2, pp. 1–9, 2022.
 - [9] A. Lestari, V. T. Situmorang, K. A. Ridwan, and A. Manggala, “Analisa Efisiensi Termal Water Tube Boiler Berdasarkan Rasio Udara Bahan Bakar LPG Untuk Memproduksi Saturated dan Superheated Steam Teknik Energi / Teknik Kimia , Politeknik Negeri Sriwijaya , Indonesia Analysis Of Thermal Efficiency Water Tube Boiler Based On Lpg Fuel Air Ratio To Produce Saturated And Superheated Steam,” vol. 1, no. 10, pp. 415–421, 2021.
 - [10] D. Patriana S, T. Taqiyuddin, and A. Ariyandi, “Analisis Variasi Pembebanan Terhadap Konsumsi Bahan Bakar Spesifik Pembangkit Batubara , Heat Rate dan Biaya Produksi Listrik di PLTU Asam Asam Unit 4,” vol. 9, no. 1, 2024.