

Analisis Efektivitas *Thermal* dan Laju Aliran *Massa Steam* dari *Saturated* Menuju *Superheater* di Pabrik Kelapa Sawit

Andhi Fuad Bawazir¹, Zulham Effendi^{2*}

Email corresponding author: zulham@itsi.ac.id

Program Studi Teknologi Hasil Perkebunan, Fakultas vokasi, Institut Teknologi Sawit Indonesia

Article history: Received: 13 Mei 2026 | Revised: 22 Juni 2026 | Accepted: 29 Juni 2026

Abstract. *In the Palm Oil Mill (PKS) production system, the boiler is the main component that functions to produce steam for processing needs and turbine driving. The performance of the superheater plays an important role in improving steam quality by converting saturated steam into superheated steam, thereby supporting boiler operational efficiency. This study aims to analyze the thermal effectiveness of the superheater and determine the steam mass flow rate in the Takuma N-750 type boiler in the Palm Oil Mill. The research method used is descriptive quantitative with the collection of boiler operational data for five days of observation. The data analyzed include the superheater outlet steam temperature, operating pressure, steam density, and pipe cross-sectional area. The enthalpy value is determined through steam table interpolation using ChemicalLogic SteamTab Companion software. The results show that the superheater outlet steam temperature is in the range of 297.2–305.4°C with a stable operating pressure of 21 bar. The steam mass flow rate ranged from 23.28–26.71 tons/hour or 6.40–7.42 kg/second, with an average value close to the boiler design capacity of 27 tons/hour. The actual enthalpy value of the superheater outlet steam was in the range of 3014.75–3033.91 kJ/kg, while the design enthalpy was 3135.54 kJ/kg. The calculation results showed that the thermal effectiveness of the superheater was in the range of 96.1–96.7%, indicating that the heat transfer process was effective and relatively stable during the observation period. The stability of temperature, operating pressure, and mass flow rate indicated that the boiler operated at steady-state conditions with good system performance and was able to support the processing needs in the palm oil mill.*

Keywords – Boiler; Thermal Effectiveness; Mass Flow Rate; Stationery; Superheater.

Abstrak Dalam sistem produksi Pabrik Kelapa Sawit (PKS), boiler merupakan komponen utama yang berfungsi menghasilkan steam untuk kebutuhan proses pengolahan dan penggerak turbin. Kinerja superheater berperan penting dalam meningkatkan kualitas steam dengan mengubah saturated steam menjadi superheated steam sehingga mendukung efisiensi operasional boiler. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis efektivitas termal superheater serta menentukan laju aliran massa steam pada boiler Takuma tipe N-750 di Pabrik Kelapa Sawit. Metode penelitian yang digunakan adalah deskriptif kuantitatif dengan pengambilan data operasional boiler selama lima hari pengamatan. Data yang dianalisis meliputi temperatur steam keluar superheater, tekanan operasi, densitas steam, dan luas penampang pipa. Nilai entalpi ditentukan melalui interpolasi tabel uap menggunakan perangkat lunak ChemicalLogic SteamTab Companion. Hasil penelitian menunjukkan bahwa temperatur steam keluar superheater berada pada kisaran 297,2–305,4°C dengan tekanan operasi stabil sebesar 21 bar. Laju aliran massa steam berkisar antara 23,28–26,71 ton/jam atau 6,40–7,42 kg/detik, dengan nilai rata-rata mendekati kapasitas desain boiler sebesar 27 ton/jam. Nilai entalpi aktual steam keluar superheater berada pada rentang 3014,75–3033,91 kJ/kg, sedangkan entalpi desain sebesar 3135,54 kJ/kg. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa efektivitas termal superheater berada pada kisaran 96,1–96,7%, yang mengindikasikan bahwa proses perpindahan panas berlangsung secara efektif dan relatif stabil selama periode pengamatan. Stabilitas temperatur, tekanan operasi, dan laju aliran massa menunjukkan bahwa boiler beroperasi pada kondisi steady-state dengan performa sistem yang baik dan mampu mendukung kebutuhan proses pengolahan di pabrik kelapa sawit.

Kata Kunci – Boiler; Efektivitas Termal; Laju Aliran Massa; PKS; Superheater.

PENDAHULUAN

Industri kelapa sawit di Indonesia terus menunjukkan pertumbuhan signifikan dan menjadi pilar utama penyumbang devisa negara serta penyedia bahan baku minyak nabati untuk pasar domestik maupun ekspor [1]. Dalam proses pengolahan kelapa sawit, sistem pembangkit uap atau boiler merupakan komponen esensial yang berfungsi mengubah air menjadi energi uap [2]. Uap tersebut digunakan untuk berbagai tahapan krusial, mulai dari sterilisasi Tandan Buah Segar (TBS), penggerak turbin untuk energi listrik, hingga pemanas minyak [3].

Sebagai bejana bertekanan, boiler bekerja dengan memanaskan air umpan yang telah melewati proses deaerasi menuju *feed water*. Pembentukan uap terjadi di dalam *steam drum*, di mana air diuapkan menjadi uap basah (*saturated*

steam). Uap basah ini kemudian dialirkan menuju *superheater* untuk dipanaskan lebih lanjut hingga menjadi uap panas lanjut atau uap kering (*superheated steam*) [4]. Efisiensi kerja *boiler* sangat bergantung pada karakteristik aliran fluida yang menuju perpipaan *superheater* [5].

Ketersediaan uap yang dihasilkan *boiler* harus mampu memenuhi kebutuhan operasional pabrik secara konsisten. Hal ini sangat dipengaruhi oleh konsumsi dan komposisi bahan bakar yang digunakan, umumnya berupa kombinasi cangkang dan serabut kelapa sawit dengan perbandingan tertentu (misalnya 3:1) untuk menjaga nilai kalor pembakaran [6]. Ketidak stabilan laju aliran massa steam dapat memicu pemborosan energi bahan bakar, sementara efektivitas thermal yang tidak optimal pada jalur *steam drum* menuju *superheater* akan mengakibatkan penurunan kinerja *boiler* secara keseluruhan [3].

Urgensi penelitian ini terletak pada pentingnya menjaga performa *superheater* agar proses transformasi uap jenuh menjadi uap panas lanjut berjalan optimal. Jika efektivitas *thermal* dan laju aliran massa tidak dipantau dengan baik, risiko kerusakan pada komponen *boiler* dan efisiensi energi yang rendah menjadi tantangan serius bagi industri. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis efektivitas *thermal* pada *superheater* serta menentukan laju aliran massa steam dari kondisi saturasi menuju *superheater* di Pabrik Kelapa Sawit (PKS). Melalui studi ini, diharapkan diperoleh data akurat mengenai performa operasional *boiler* dibandingkan dengan standar desainnya, yang dapat menjadi referensi teknis bagi sektor industri untuk meningkatkan produktivitas dan keberlanjutan operasional.

Berbagai penelitian telah dilakukan untuk mengevaluasi kinerja boiler dan superheater pada industri berbasis biomassa. As'ari et al. (2025) menganalisis efisiensi kinerja water tube boiler berdasarkan kapasitas olah pabrik kelapa sawit dan menunjukkan bahwa kestabilan operasi boiler sangat mempengaruhi efisiensi produksi steam. Meneliti pengaruh air fuel ratio dan pengendalian level air terhadap efisiensi thermal boiler dalam menghasilkan superheated steam [2]. Mengevaluasi perpindahan panas dan efisiensi superheater pada multi fuel boiler dan menemukan bahwa kondisi perpindahan panas pada superheater menjadi faktor penting dalam menentukan kualitas steam yang dihasilkan [7].

Penelitian lain menunjukkan bahwa performa superheater sangat dipengaruhi oleh temperatur gas hasil pembakaran, laju aliran massa steam, serta kondisi permukaan perpindahan panas. Trojan dan Taler [8] menjelaskan bahwa perubahan laju aliran steam dan temperatur gas pembakaran dapat mempengaruhi distribusi temperatur pada superheater sehingga berdampak pada efisiensi perpindahan panas. Penelitian terbaru oleh J, Daya et all mengenai analisis energi dan eksergi pada industri kelapa sawit juga menunjukkan bahwa optimasi sistem boiler dan superheater berperan penting dalam meningkatkan efisiensi energi pabrik secara keseluruhan [9].

Meskipun berbagai penelitian telah membahas efisiensi boiler dan karakteristik perpindahan panas pada superheater, sebagian besar penelitian masih berfokus pada evaluasi efisiensi boiler secara keseluruhan, analisis bahan bakar, maupun simulasi perpindahan panas. Kajian yang secara khusus menganalisis hubungan antara laju aliran massa steam dan kinerja thermal superheater berdasarkan data operasional aktual pada boiler Takuma tipe N-750 di industri kelapa sawit masih relatif terbatas [10].

Selain itu, penelitian sebelumnya umumnya menggunakan pendekatan efisiensi boiler secara umum, sedangkan evaluasi performa superheater berdasarkan perbandingan entalpi aktual terhadap entalpi desain menggunakan data lapangan secara langsung belum banyak dilaporkan. Oleh karena itu diperlukan penelitian yang mampu memberikan gambaran aktual mengenai kondisi operasi superheater pada sistem boiler pabrik kelapa sawit [3].

Kebaruan (*novelty*) penelitian ini terletak pada analisis simultan antara laju aliran massa steam dan kinerja thermal superheater menggunakan data operasional aktual boiler Takuma tipe N-750 pada Pabrik Kelapa Sawit. Penelitian ini tidak hanya mengevaluasi temperatur steam keluar superheater, tetapi juga menghubungkannya dengan perubahan entalpi steam dan laju aliran massa untuk menggambarkan performa aktual superheater terhadap kondisi desain. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi teknis dalam evaluasi kinerja boiler biomassa pada industri kelapa sawit.

METODE

Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Pabrik Kelapa Sawit (PKS), Desa Lubuk Bunut, Kecamatan Huta Raja Tinggi, Kabupaten Padang Lawas, Sumatera Utara. Pengambilan data operasional dilakukan selama periode Desember 2025 hingga Februari 2026.

Bahan-bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah sekunder yang berasal dari : *temperature out/* temperatur uap keluar *Superheater* (h_{aktual}), *Temperature desain/* maximal temperatur *evaporation steam* (h_{desain}), data oprasional (*logsheet boiler*), data Desain. Adapun alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah: *boiler Takuma*, *Flow meter steam*, *Flow meter pressure*, *Papeless Recorder YOKOGAWA* , *Ear plug* (penutup telinga), Alat tulis.

Objek utama penelitian adalah unit *Water Tube Boiler* merek Takuma tipe N 750 dengan kapasitas desain 27.000 kg/jam. Alat yang digunakan dalam pengumpulan data meliputi *Paperless Recorder YOKOGAWA* untuk memantau

suhu dan tekanan secara *real-time*, serta perangkat lunak *ChemicaLogic SteamTab Companion* dan tabel uap (ASME) untuk menentukan properti termodinamika steam.

Tahapan Penelitian

- Data Spesifikasi Boiler
Melakukan pengambilan data pada name plate yang terdapat pada boiler, yang meliputi tekanan kerja desain (bar), *temperature steam* (°C), kapasitas uap (ton/jam).
- Data Oprasional
Pengambilan data oprasional dilakukan setiap 1 jam sebanyak 9 kali dalam satu hari, dengan melihat panel pada *flow mater steam*, *flow meter temperature*, dan *papealless Recorder YOKOGAWA*. Untuk memeproleh data yang akurat, pengambilan dilakukan selama 5 hari berturut-turut.
- Analisis Data
Setelah data Spesifikasi dan data oprasional terkumpul, maka dilakukan perhitungan dengan persamaan efektivitas *thermal* dan persamaan laju aliran massa. Data-data yang diperoleh kemudian dianalisa untuk memperoleh table sebagai hasil penelitian.

Analisis Data

- Entalpi
Untuk menentukan data entalpi pada steam tabel, diperlukan data tekanan, temepnatur uap keluar superheater, temepnatur uap desain [5]. Data suhu/ temperatur yang diperoleh kemudian di interpolasi untuk memperoleh nilai entalpi yang sesuai dengan steam tabel. Adapun rumus interpolasi yang di gunakan adalah sebagai berikut :

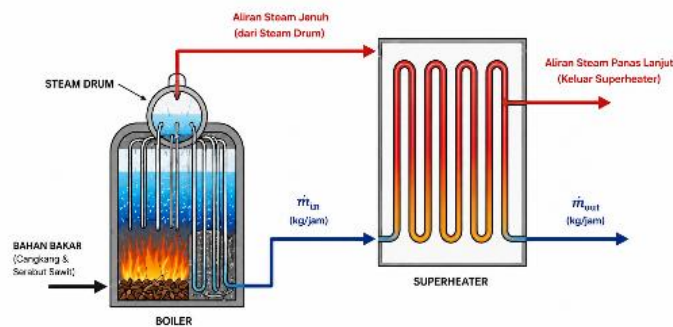
$$h = h_1 \frac{(T-T_1)}{(T_2-T_1)} \times (h_2 - h_1) \quad (1)$$

keterangan : .

- h : nilai entalpi temperatur (kj/kg)
- T : temperatur aktual (°C)
- T1 : temperatur desain (°C)
- T2 : temperatur aktual tertinggi (°C)
- h1 : Nilai entalpi pada T_1 (kJ/kg)
- h2 : nilai entalpi T_2 (kJ/kg)

- Laju Aliran Massa Steam

ILUSTRASI LAJU ALIRAN MASSA STEAM



Gambar 1. Ilustrasi laju aliran massa

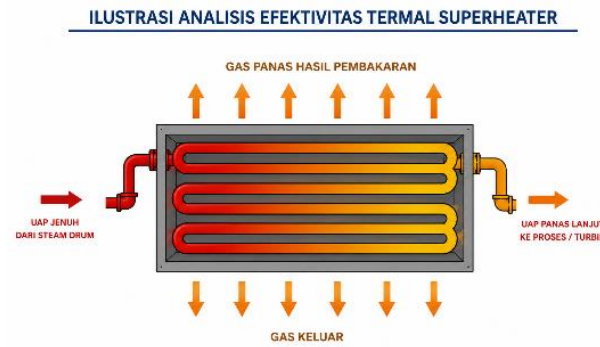
Nilai telah di dapat dianalisis menggunakan pendekatan mekanika fluida, dan Termodinamika [11]. Dimana ρ adalah densitas uap (kg/m³), A adalah luasan penampang pipa (m²), V adalah kecepatan uap (m/s). Laju aliran massa (M) dihitung menggunakan persamaan :

$$M = \rho \times A \times V \quad (2)$$

Keterangan :

- M : laju aliran massa steam (kg/jam)
- ρ : densitas uap (kg/m³)
- A : luasan penampang pipa (m²)
- V : kecepatan uap (m/s)

c. Efektivitas Termal Superheater



Gambar 2. Ilustrasi analisis efektivitas termal superheater

Efektifitas termal pada *superheater* dihitung dengan membandingkan entalpi aktual hasil pengamatan terhadap entalpi desain uap panas lanjut. Nilai entalpi (ϵ) ditentukan melalui metode interpolasi linier pada tabel uap berdasarkan tekanan dan suhu yang terukur di lapangan. Efektivitas Termal dihitung dengan rumus persamaan:

$$\epsilon = \frac{h_{\text{aktual}}}{h_{\text{desain}}} \times 100\% \quad (3)$$

Keterangan :

- ϵ : Efektivitas termal (%)
- h_{aktual} : entalpi dari *temperatur out superheater* (kJ/kg)
- h_{desain} : entalpi dari *temperatur desain* (kJ/kg)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Data spesifikasi boiler

Dari penelitian yang telah dilaksanakan, diperoleh data spesifikasi boiler pada pabrik kelapa sawit dengan kapasitas 30 ton/jam, dengan jenis ketel uap water tube boiler, model N 750 sa, kapasitas uap 29 kg/cm², tekanan kerja desain 25 kg/cm², temperatur uap 350°C, *maxsiamal steam evaporation* 27.000 kg/jam.

Perhitungan entalpi

Nilai entalpi ditentukan dengan melakukan perhitungan interpolasi dari nilai tekanan (bar) dan nilai *temperature* (°C). Menentukan nilai entalpi pada hari ke 1 jam 13.00 wib dengan *temperature out superheater* 280°C maka:

$$h = 2975,4 \frac{(298-280)}{(300-280)} \times (3023,5 - 2975,4)$$

$$h = 2975,4 \times \frac{18}{20} \times 48,1$$

$$h = 2975,4 + 43,29$$

$$h = 3018,69 \text{ kJ/kg}$$

Laju aliran Massa

Laju aliran massa *steam* di tentukan menggunakan persamaan dengan parameter densitas steam out *superheater* (ρ), nilai luas penampang pipa (m²), kecepatan massa *steam* (m/detik) [11]. Maka diperoleh laju aliran massa *steam* seperti berikut:

Laju aliran massa

$$\begin{aligned} M &= \rho \times A \times v \\ &= 8.437 \times 0,01865 \text{ m}^2 \times 46,96 \text{ m/s} \\ &= 7,12 \text{ kg/detik} \\ &= 25.62 \text{ kg/jam} \end{aligned}$$

Tabel 1. Laju aliran massa *steam*

Jam	Pressure	Temperature steam out		Luas penampang (m ²)	Laju aliran massa	
	Tekanan (bar)	°C	Densitas		ton/jam	kg/detik
09.00	21	303.8	8,321	0,01865	23.276	6,4
10.00	21	305.4	8,293	0,01865	23.832	6,62
11.00	21	299.6	8,397	0,01865	24.192	6,72
12.00	21	300	8,390	0,01865	24.012	6,67
13.00	21	297.4	8,437	0,01865	25.624	7,11
14.00	21	303.4	8,329	0,01865	25.840	7
15.00	21	304	8,318	0,01865	26.712	7,42
16.00	21	303.6	8,325	0,01865	24.840	6,9
17.00	21	299.6	8,397	0,01865	23.744	6,5

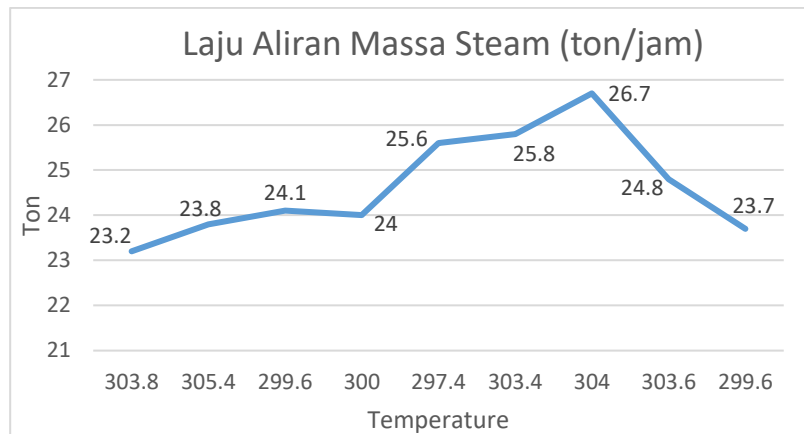
Berdasarkan hasil perhitungan, nilai kinerja termal superheater berada pada rentang 96,1–96,7% dengan temperatur steam keluar superheater berkisar antara 297,2–305,4°C. Nilai tersebut menunjukkan bahwa energi panas yang ditransfer dari gas hasil pembakaran ke steam mampu menghasilkan entalpi aktual sebesar 3014,75–3033,91 kJ/kg atau mendekati entalpi desain sebesar 3135,54 kJ/kg. Kondisi ini mengindikasikan bahwa proses perpindahan panas pada superheater masih berlangsung secara efektif dan mampu mempertahankan kualitas steam pada kondisi operasi normal [3].

Nilai kinerja termal tertinggi terjadi pada pukul 10.00 sebesar 96,7% dengan temperatur steam keluar mencapai 305,4°C dan entalpi aktual sebesar 3033,91 kJ/kg. Kondisi ini menunjukkan bahwa perpindahan panas antara gas hasil pembakaran dan steam berlangsung lebih optimal dibandingkan waktu pengamatan lainnya. Fenomena tersebut dapat terjadi karena temperatur gas pembakaran yang relatif tinggi serta kestabilan proses pembakaran biomassa sehingga energi panas yang diterima superheater meningkat. Menurut teori perpindahan panas, semakin besar perbedaan temperatur antara gas panas dan steam, maka laju perpindahan panas yang terjadi juga semakin besar sehingga temperatur dan entalpi steam akan meningkat [10].

Sebaliknya, nilai kinerja termal terendah terjadi pada pukul 13.00 sebesar 96,1% dengan temperatur steam keluar sebesar 297,2°C dan entalpi aktual 3014,75 kJ/kg. Penurunan ini mengindikasikan bahwa jumlah energi panas yang diterima steam lebih rendah dibandingkan periode lainnya. Kondisi tersebut dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor operasional, antara lain fluktuasi suplai bahan bakar biomassa, perubahan temperatur gas hasil pembakaran, peningkatan kebutuhan steam pada proses produksi, maupun adanya penurunan efektivitas perpindahan panas akibat terbentuknya deposit abu (*fouling*) pada permukaan pipa superheater. Akumulasi deposit pada permukaan pipa dapat meningkatkan tahanan termal sehingga mengurangi laju perpindahan panas dari gas pembakaran menuju steam [12].

Meskipun terjadi fluktuasi temperatur selama periode pengamatan, perubahan nilai kinerja termal relatif kecil, yaitu hanya sekitar 0,6%. Hal ini menunjukkan bahwa sistem boiler beroperasi dalam kondisi yang stabil (*steady-state operation*). Stabilitas tersebut diperkuat oleh tekanan operasi yang tetap berada pada nilai 21 bar selama pengamatan. Pada kondisi operasi yang stabil, distribusi panas di dalam ruang bakar dan sistem perpindahan panas boiler cenderung konstan sehingga kualitas steam yang dihasilkan dapat dipertahankan sesuai kebutuhan proses pabrik [2].

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa kinerja termal superheater tidak hanya ditentukan oleh temperatur steam keluar, tetapi juga dipengaruhi oleh interaksi antara proses pembakaran, karakteristik aliran steam, dan efektivitas perpindahan panas pada permukaan superheater [3]. Oleh karena itu, pemantauan temperatur steam, kondisi permukaan pipa, serta kestabilan proses pembakaran menjadi faktor penting untuk menjaga performa superheater agar tetap mendekati kondisi desain. Dengan nilai kinerja termal sebesar 96,1–96,7%, superheater pada boiler Takuma tipe N-750 masih menunjukkan kemampuan yang baik dalam menghasilkan superheated steam dan mendukung kontinuitas operasi pabrik kelapa sawit [13].



Gambar 3. Grafik laju aliran massa steam

Hasil penelitian ini sejalan dengan temuan [12] yang menyatakan bahwa performa superheater sangat dipengaruhi oleh kualitas perpindahan panas antara gas pembakaran dan steam. Selain itu, [3] menjelaskan bahwa terbentuknya fouling pada permukaan superheater dapat menurunkan laju perpindahan panas dan menyebabkan temperatur steam keluar lebih rendah dari kondisi desain. Pada penelitian ini, nilai kinerja termal yang tetap berada di atas 96% menunjukkan bahwa pengaruh hambatan perpindahan panas masih relatif kecil sehingga superheater mampu beroperasi mendekati kondisi desainnya [14].

Efektivitas Thermal

Efektivitas *Thermal* ditentukan menggunakan persamaan dengan parameter entalpi temperatur *out superheater* (h_{aktual}), dan entalpi temperatur steam desain (h_{desain}) [2]. Maka di peroleh Efektivitas termal *superheater*:

Efektivitas *Thermal*

$$(\epsilon) = \frac{h_{\text{aktual}}}{h_{\text{desain}}} \times 100 = \%$$

$$\epsilon = \frac{303.8}{350} \times 100 = \%$$

$$\epsilon = \frac{3030.18 \text{ kJ/kg}}{3135.54 \text{ kJ/kg}} \times 100 = 96,6 \%$$

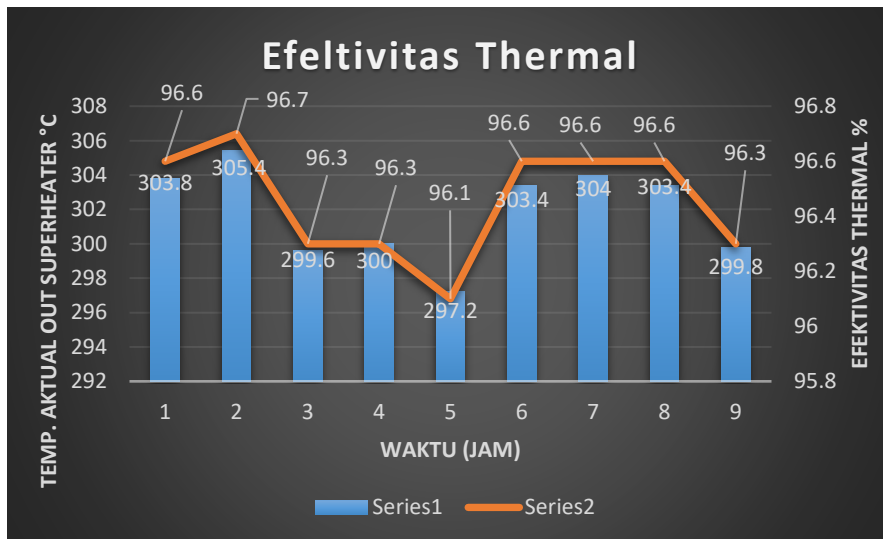
$$\epsilon = 96,6 \%$$

Tabel 2. Efektivitas termal superheater

jam	temp. out steam superheater rata-rata (°c)	max temp. steam out desain (°c)	entalpi aktual steam out Superheater (kJ/kg)	entalpi max temp steam desain (kJ/kg)	efektivitas thermal superheater (%)
09.00	303.8	350	3030.18	3135.54	96.6
10.00	305.4	350	3033.91	3135.54	96.7
11.00	299.6	350	3020.37	3135.54	96.3
12.00	300	350	3020.27	3135.54	96.3
13.00	297.2	350	3014.75	3135.54	96.1
14.00	303.4	350	3029.25	3135.54	96.6
15.00	304	350	3030.65	3135.54	96.6
16.00	303.4	350	3029.25	3135.54	96.6
17.00	299.8	350	3020.84	3135.54	96.3

Berdasarkan data pengamatan pada Superheater PKS yang dilakukan dari pukul 09.00 hingga 17.00, diperoleh nilai temperatur keluaran uap (steam outlet temperature) berkisar antara 297,2°C hingga 305,4°C, sedangkan temperatur desain Superheater adalah 350°C. Temperatur keluaran aktual yang masih berada di bawah temperatur desain menunjukkan bahwa proses pemanasan lanjut (superheating) berlangsung dengan baik, namun belum mencapai kondisi optimum sesuai spesifikasi rancangan.

Nilai entalpi uap keluaran Superheater aktual berada pada rentang 3014,75–3033,91 kJ/kg, sementara entalpi maksimum berdasarkan temperatur desain sebesar 3135,54 kJ/kg. Selisih entalpi ini menunjukkan bahwa energi panas yang diterima uap dari Superheater belum sepenuhnya mencapai nilai yang direncanakan dalam desain [15]. Hal tersebut dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti fluktuasi beban boiler, perubahan laju aliran massa uap, kondisi perpindahan panas pada pipa Superheater, maupun variasi temperatur gas hasil pembakaran yang mengalir melewati permukaan pemanas. Hasil perhitungan efektivitas thermal Superheater menunjukkan nilai yang relatif tinggi dan stabil, yaitu berkisar antara 96,1% hingga 96,7%. Nilai efektivitas tertinggi terjadi pada pukul 10.00 sebesar 96,7%, dengan temperatur keluaran uap mencapai 305,4°C dan entalpi sebesar 3033,91 kJ/kg. Kondisi ini mengindikasikan bahwa proses perpindahan panas pada Superheater berlangsung paling optimal dibandingkan waktu pengamatan lainnya. Sebaliknya, efektivitas thermal terendah terjadi pada pukul 13.00 sebesar 96,1%, ketika temperatur keluaran uap turun menjadi 297,2°C dan entalpi aktual menjadi 3014,75 kJ/kg. Penurunan ini menunjukkan berkurangnya jumlah panas yang diserap uap dari gas panas pembakaran. Kemungkinan penyebabnya adalah penurunan temperatur gas buang, perubahan laju aliran massa uap, atau adanya fouling (kerak) pada permukaan pipa Superheater yang dapat menurunkan koefisien perpindahan panas [7].



Gambar 4. Grafik efektivitas termal superheater

Nilai kinerja termal berada pada rentang 96,1–96,7% dengan fluktuasi yang relatif kecil pada setiap jam pengamatan. Nilai tertinggi terjadi pada pukul 10.00 sebesar 96,7%, sedangkan nilai terendah terjadi pada pukul 13.00 sebesar 96,1%. Secara umum, grafik menunjukkan bahwa kinerja termal superheater cenderung stabil dan tidak mengalami perubahan yang signifikan selama operasi boiler berlangsung. Hal ini mengindikasikan bahwa sistem perpindahan panas pada superheater masih mampu mempertahankan kondisi operasi mendekati spesifikasi desain meskipun terjadi variasi temperatur steam keluar selama pengamatan [3].

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan pada boiler Takuma tipe N-750 di Pabrik Kelapa Sawit, dapat disimpulkan bahwa superheater mampu mempertahankan kualitas steam pada kondisi operasi yang relatif stabil dengan tekanan konstan sebesar 21 bar. Temperatur steam keluar superheater berada pada rentang 297,2–305,4°C sehingga menghasilkan nilai entalpi aktual sebesar 3014,75–3033,91 kJ/kg. Kondisi ini menunjukkan bahwa proses perpindahan panas dari gas hasil pembakaran menuju steam berlangsung secara efektif dan mampu menghasilkan superheated steam yang sesuai untuk kebutuhan proses dan pembangkit tenaga di pabrik.

Laju aliran massa steam yang diperoleh berkisar antara 23,28–26,71 ton/jam atau mendekati kapasitas desain boiler sebesar 27 ton/jam. Hal ini mengindikasikan bahwa sistem pembakaran dan pembangkitan steam bekerja dalam

kondisi yang stabil serta mampu memenuhi kebutuhan energi operasional pabrik tanpa mengalami fluktuasi yang signifikan.

Nilai kinerja termal superheater berada pada kisaran 96,1–96,7%, yang menunjukkan bahwa performa aktual superheater masih mendekati kondisi desain. Stabilitas nilai tersebut mengindikasikan bahwa perpindahan panas pada superheater berlangsung secara konsisten meskipun terjadi variasi temperatur dan laju aliran massa steam selama pengamatan. Dengan demikian, kinerja superheater pada boiler Takuma N-750 dapat dikategorikan baik dan mendukung terciptanya operasi boiler yang efisien serta berkelanjutan pada industri kelapa sawit.

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji ucapan terimakasih saya sampaikan kepada semua pihak yang telah memberikan bantuan moral maupun material selama proses penelitian berlangsung. Pelusis juga mengapresiasi dukungan institusi, serta rekan-rekan yang telah membantu pengumpulan data dan penyelesaian artikel ilmiah ini.

REFERENSI

- [1] As'ari F, Yunaidi Y, Panjaitan MD. Analisis Efisiensi Kinerja Water Tube Boiler Berbasis Kapasitas Olah di PKS PT Mulia Sawit Agro Lestari (MSAL). *Perkebunan Dan Lahan Tropika* 2025;15:52–9. <https://doi.org/10.26418/plt.v15i2.98678>.
- [2] Salsabila S, Zurohaina Z, Tahdid T. Thermal Efficiency of Water Tube Boiler Reviewed from the Effect of Air Fuel Ratio and Water Level Control on Superheated Steam Production. *Jurnal Penelitian Sains* 2024;26:366. <https://doi.org/10.56064/jps.v26i3.1075>.
- [3] Effendi Z, Aisyah S, Hastyanda R. Fuel Used Analysis on Boiler Efficiency Variations and Water Intake Temperature Affected by Palm Oil Varieties. *Agro Bali* 2021;4:94–105. <https://doi.org/10.37637/ab.v4i1.634>.
- [4] Duarte CA, Espejo E, Martinez JC. Failure analysis of the wall tubes of a water-tube boiler. *Eng Fail Anal* 2017;79:704–13. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2017.05.032>.
- [5] Moran MJ. *Engineering thermodynamics*. 2018.
- [6] Roni KA. Analisis Pengaruh Rasio Serabut Dan Cangkang Kelapa Sawit Sebagai Bahan Bakar Pada Boiler. *Jurnal Redoks* 2021;6:1. <https://doi.org/10.31851/redoks.v6i1.5230>.
- [7] Panjaitan JRH, Sihotang JS, Sirait KM, Pakpaha R. Evaluasi perpindahan panas dan efisiensi superheater pada unit multi fuel boiler. *Dinamika Teknik Mesin* 2024;14:54. <https://doi.org/10.29303/dtm.v14i1.761>.
- [8] Trojan M, Taler D. Thermal simulation of superheaters taking into account the processes occurring on the side of the steam and flue gas. *Fuel* 2015;150:75–87. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.01.095>.
- [9] Peneltian J, Daya S, Teknik F, Perairan S, Hkbp U, Pematangsiantar N, et al. Analisis Energi Tandan Kosong Kelapa Sawit (Tkks) Serat (Fiber) dan Cangkang (Sheel) Sebagai Bahan Bakar Pada Boiler Pabrik Kelapa Sawit PENDAHULUAN Indonesia merupakan produsen kelapa sawit terbesar di dunia dengan hasil Tandan Buah Segar (TBS) y 2025:83–94.
- [10] Zulham Effendi, Zakwan, Amar Fauzi Nainggolan. Analisa Kehilangan Energi Pada Boiler Pabrik Kelapa Sawit Energy Loss Analysis on the Palm Oil Mill Boiler. *Jurnal Agro Fabrica* 2020;2:30–7. <https://doi.org/10.47199/jaf.v2i1.132>.
- [11] Ismail RFT, Wijaya W. Distribusi Air Bersih Di Kawasan Kampus Itb Ganesha Dengan Metode Hardy-Cross. *ReTiMs* 2021;3:10–20.
- [12] Ihsan S, Widodo WA, Agus IN, Saputra A. Utilization of Palm Frond Waste as Fuel for Co-Firing Coal and Biomass in a Tangentially Pulverized Coal Boiler Using Computational Fluid Dynamic Analysis 2024:1142–63.
- [13] Effendi Z, Aisyah S, Pratama S. *Jurnal Teknologi Pertanian Andalas Vol. 25, No.1. Jurnal Teknologi Pertanian Andalas* 2021;Vol. 25, N:6–15.
- [14] Keman AM, Mardesci H, Ilmu M, Sekolah P, Universitas P, Kuning L. *Journal of tropical agro-environmental* 2025;1:18–40.
- [15] Trojan M, Taler D. Thermal simulation of superheaters taking into account the processes occurring on the side of the steam and flue gas. *Fuel* 2015;150:75–87. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.01.095>.