

Analisa Kegagalan Laju Kalor Di Boiler Berdasarkan Failure Modes And Effect Analysis (FMEA)

Zulham Effendi¹, Zakwan², Gracela Noviana Harefa^{3*}

^{1,2,3}Jurusan Teknologi Pengolahan Hasil Perkebunan, Fakultas Vokasi, Institut Teknologi Sawit Indonesia Jl.Rumah Sakit H., Kenangan Baru, Kec. Percut Sei Tuan, Kabupaten Deli Serdang, Sumatera Utara

*Corresponding author: gracelaharefa16@gmail.com

Abstract

The boiler is one of the main components in palm oil mill operations, functioning to generate steam with an optimal heat rate to support the production process. However, fluctuations in heat rates and decreased boiler efficiency frequently occur, disrupting process stability and increasing operational failure risks. This study aims to analyze the heat rate failure and thermal efficiency of the boiler, identify potential system failures, and classify their risk levels using the Failure Modes and Effect Analysis (FMEA) method. The research method was conducted through field observations over a 7-day period (March 3–10, 2025) on a Takuma 600 SA water tube boiler model with a capacity of 60 tons/hour at a Palm Oil Mill. Primary and secondary data—including temperature, pressure, fuel mass, and steam production—were collected from the operator's daily logsheets to calculate enthalpy, heat rate, and efficiency. Subsequently, the FMEA risk analysis evaluated severity, occurrence, and detection scores (1–5 scale) to determine the Risk Priority Number (RPN). The thermodynamic results revealed that the operational heat rate fluctuated between 12,787 kJ/s and 13,867 kJ/s, failing to meet the standard boiler specification of 14,002 kJ/s. Boiler thermal efficiency also varied between 38.90% and 42.22%. Based on the FMEA analysis, five failure modes were identified, with two primary risks exceeding the critical RPN threshold (>30): scaling in steam pipes with the highest RPN of 64, and boiler pipe leakage with an RPN of 30. The study recommends mitigation strategies including routine chemical cleaning and water treatment to prevent scaling, alongside regular pipe inspections using Non-Destructive Testing (NDT) to sustain operational stability and thermal efficiency.

Keywords: Heat rate, Boiler, FMEA

Abstrak

Boiler merupakan salah satu komponen utama dalam operasional pabrik kelapa sawit yang berfungsi menghasilkan uap dengan laju kalor optimal guna menunjang proses produksi. Namun, fluktuasi laju kalor dan penurunan efisiensi boiler sering terjadi sehingga mengganggu kestabilan proses dan meningkatkan risiko kegagalan operasional. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kegagalan laju kalor dan efisiensi termal pada boiler, mengidentifikasi potensi kegagalan sistem, serta menentukan tingkatan risiko menggunakan metode *Failure Modes and Effect Analysis* (FMEA). Metode penelitian dilakukan melalui observasi lapangan selama 7 hari (3–10 Maret 2025) pada boiler pipa air (*water tube*) model Takuma 600 SA berkapasitas 60 ton/jam di Pabrik Kelapa Sawit. Data primer dan sekunder meliputi suhu, tekanan, massa bahan bakar, dan produksi uap yang diambil dari logsheet harian operator untuk dihitung nilai entalpi, laju kalor, dan efisiensinya. Selanjutnya, analisis risiko FMEA dilakukan dengan mengevaluasi skor *severity*, *occurrence*, dan *detection* (skala 1–5) untuk menghitung

DOI: <http://dx.doi.org/10.24127/trb.v15i1.4517>

Received 20 August 2025; Received in revised form 10 June 2025; Accepted 22 June 2026

Available online 30 June 2026



Risk Priority Number (RPN). Hasil analisis termodinamika menunjukkan terjadinya fluktuasi laju kalor rata-rata operasional antara 12.787 kJ/s hingga 13.867 kJ/s, di mana nilai ini belum mencapai standar spesifikasi boiler sebesar 14.002 kJ/s. Efisiensi termal boiler turut bervariasi antara 38,90% hingga 42,22%. Berdasarkan analisis FMEA, ditemukan lima mode kegagalan dengan dua risiko tertinggi yang melampaui batas kritis RPN (>30), yaitu timbulnya kerak (*scaling*) pada pipa-pipa uap dengan nilai RPN tertinggi sebesar 64, dan kebocoran pipa boiler dengan nilai RPN sebesar 30. Penelitian ini merekomendasikan tindakan mitigasi berupa pembersihan kimia (*chemical cleaning*) dan water treatment berkala untuk mengatasi kerak, serta inspeksi pipa menggunakan metode *Non-Destructive Testing* (NDT) demi menjaga stabilitas operasional dan efisiensi boiler.

Kata kunci: Laju Kalor, Boiler, FMEA

1. Pendahuluan

Pabrik kelapa sawit (PKS) membutuhkan energi yang besar dalam proses pengolahannya untuk menghasilkan *crude palm oil* (CPO) dan inti sawit (*kernel*) [1], boiler memainkan peran krusial dalam operasional PKS, seringkali dianggap sebagai "jantung" dari sebuah pabrik tersebut. Boiler berfungsi menghasilkan uap yang digunakan dalam proses produksi serta membangkitkan listrik untuk kebutuhan pabrik dan perumahan karyawan di sekitarnya. Boiler berbentuk tabung atau bejana menghasilkan steam dengan cara memanaskan air hingga menjadi uap [2].

Uap air (*steam*) dihasilkan dari pemanasan air dalam pipa-pipa mesin boiler [3], yang dimanfaatkan untuk proses produksi dengan konsumsi Cangkang (*shell*) dan serabut (*fiber*) kelapa sawit sebagai bahan bakar utamanya, sedangkan air berperan sebagai media yang akan menghasilkan uap panas. Energi yang dihasilkan dari proses konversi dalam boiler sering kali tidak seimbang, menimbulkan masalah-masalah dalam sistem efisiensi kerja pada boiler [4]. Masalah umum yang seringkali terjadi pada sistem kinerja mesin boiler yaitu terkait dengan kualitas dan temperatur air yang masuk, dan jenis bahan bakar yang digunakan, hal ini mampu menurunkan efisiensi kinerja mesin boiler dan mengakibatkan kerusakan seperti kebocoran, korosi, penumpukan kerak, dan bahkan pecahnya pipa-pipa pada mesin boiler [5].

Boiler yang mengalami in-efisiensi pada pabrik kelapa sawit, dapat menyebabkan pasokan energi dan kebutuhan uap di setiap stasiunnya tidak akan optimal. Hal ini dapat mengakibatkan turunnya produksi minyak sawit kasar baik secara kualitas maupun kuantitas, sehingga pengawasan secara maksimal perlu dilakukan [6]. Energi kalor yang dibangkitkan dalam sistem boiler memiliki nilai tekanan, temperatur, dan laju aliran yang menentukan pemanfaatan steam yang akan digunakan. Dalam konteks pembangkit listrik, laju kalor juga berkaitan erat dengan efisiensi termal boiler [7]. Efisiensi boiler didefinisikan sebagai rasio antara energi panas yang digunakan untuk menghasilkan uap dengan energi panas yang tersedia dari bahan bakar yang dibakar. Semakin tinggi efisiensi boiler, semakin besar proporsi energi dari bahan bakar yang dikonversi menjadi uap [8]. Laju kalor merupakan parameter kunci dalam analisis termodinamika dan efisiensi sistem energi karena secara langsung menggambarkan performa perpindahan energi dari bahan bakar ke fluida kerja. Evaluasi terhadap laju kalor sangat penting dilakukan secara berkala untuk memastikan bahwa sistem boiler bekerja dalam kondisi optimal.

Oleh karena itu Penelitian ini dilakukan untuk menganalisa kegagalan laju kalor di boiler berdasarkan *Failure Modes And Effect Analysis* (FMEA) yang menjadi salah satu hal penyebab menurunnya efisiensi kinerja boiler. Tahapannya

melibatkan pengidentifikasian masukan seperti tekanan uap, suhu air umpan, aliran uap, dan konsumsi bahan bakar, kemudian dilanjutkan dengan metode FMEA (*Failure Modes and Effect Analysis*) dengan pendekatan sistematis yang dilakukan untuk mengidentifikasi, mengevaluasi, dan mengurangi risiko potensial kegagalan dalam operasi boiler. Tahapannya ini melibatkan identifikasi semua kemungkinan kegagalan, dan mengevaluasi dampak dari setiap kegagalan tersebut, serta menilai kemungkinan terjadinya kegagalan dengan menentukan tingkat *saverity*, *occurrence*, dan *detection* yang berbeda-beda sesuai dengan penyebab dan dampak yang ditimbulkan. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui faktor penyebab kegagalan terhadap laju kalor pada boiler, menganalisa kegagalan berdasarkan metode *Failure Modes And Effect Analysis* (FMEA), mengklasifikasi efek dari kegagalan laju kalor pada boiler, mengetahui tingkatan risiko dari kegagalan

2. Metode Penelitian

2.1 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di salah satu pabrik kelapa sawit dengan kapasitas 60 ton/jam di desa Bandar Selamat, kecamatan Dolok Batu Nanggar, kabupaten Simalungun, Sumatra Utara. Waktu penelitian ini berlangsung selama 7 hari, pada periode 3 – 10 Maret 2025.

2.2 Alat dan Bahan Penelitian

Alat

Alat yang menjadi fokus pada penelitian ini adalah boiler.

Tipe boiler	: Boiler pipa air (<i>water tube</i>)
Model boiler	: Takuma 600 SA
<i>Max. working pressure</i>	: 23 kg/cm ²
<i>Max. Steam evaporation</i>	: 20 ton/jam
<i>Steam temperature</i>	: 260°C
<i>Feed water temperature</i>	: 90 - 95°C
<i>Year built</i>	: 1999
Serial No	: 1100

Bahan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah data sekunder dan primer yang meliputi :

- Lembar kerja FMEA
- Dokumen pemeliharaan
- Tekanan uap kering (bar)
- Temperatur air umpan (°C)
- Steam flow (Ton uap/jam)

2.3 Tahapan Penelitian

Berikut tahapan penelitian yang dilaksanakan:

1. Melakukan obeservasi di lapangan
2. Melakukan pengambilan data sekunder dan primer berupa data pada dokumen pemeliharaan, tekanan uap kering (bar), temperatur uap kering (°C), Temperatur air umpan (°C), Steam flow (Ton uap/jam) pada lod sheet harian operator boiler.
3. Pengolahan data dan Analisa data
 - Menentukan entalpi uap kering
 - Menentukan efisiensi boiler
 - Menentukan laju kalor boiler
 - Menentukan risiko kegagalan
 - Menentukan *Risk Priority Number* (RPN)
 - Memberikan alternatif solusi

2.4 Pengolahan Data

Untuk mengetahui nilai laju kalor pada boiler dan efisiensi boiler, dapat menggunakan rumus sebagai berikut :

a. Laju kalor [9]

$$Q = m (h_{out} - h_{in}) \quad (1)$$

Keterangan :

Q	: Laju Kalor
h_{in}	: Enthalpy Fluida masuk (kJ/kg)
h_{out}	: Enthalpy Fluida keluar (kJ/kg)
m	: Laju aliran massa uap (kg/s)

b. Efisiensi boiler [10]

$$\text{Efisiensi boiler } \eta = \frac{W_s (h_3 - h_1)}{W_f \times \text{LHV}} \quad (2)$$

Keterangan :

Ws = Kapasitas produksi uap (kg uap/jam)

Wf = Konsumsi bahan bakar (kg/jam)

h3 = Enthalpy uap (kJ/kg)

h1 = Enthalpy air umpan (kJ/kg)

LHV = Nilai kalor pembakaran rendah (kJ/kg)

c. Standarisasi *Failure Modes And Effect Analysis* (FMEA)

Pengolahan data menggunakan metode FMEA berdasarkan tingkat keparahan (*saverity*), Tingkat keseringan (*occurrence*) dan Tingkat kemudahan dalam deteksi (*Detection*). Sistem evaluasi FMEA memberikan skor antara 1 dan 5 dimana 1 adalah skor terbaik dan 5 adalah skor terburuk untuk masing-masing ketiga perspektif.

Tabel 1. Ketentuan *Saverity*, *Occurrence* dan *Detection*

Rank	S	O	D
1	bahaya, kegagalan terjadi tanpa peringatan	Sangat sering	Sangat sulit dideteksi
2	ekstrem, kegagalan terjadi dengan peringatan	Sering	Sulit dideteksi
3	Signifikan	Sedang	Sedang
4	Rendah	Jarang	Cukup dideteksi
5	Kecil	Sangat jarang	Sangat mudah

Setelahnya menentukan nilai RPN untuk mengetahui risiko prioritas [11].

$$RPN = S \times O \times D \quad (3)$$

Tabel 2. Skala Nilai RPN

Level Risiko	Skala Nilai RPN
Sangat tinggi	>26
Tinggi	16-25
Sedang	11-15
Rendah	8-
Hampir tidak ada efek	1-7

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Analisa Laju Kalor Berdasarkan Spesifikasi Boiler

Berikut hasil perhitungan laju kalor berdasarkan spesifikasi boiler:

Tabel 3. Hasil Perhitungan Laju Kalor Berdasarkan Spesifikasi

h_{in} (kJ/kg)	h_{out} (kJ/kg)	m (kg/s)	Q (kJ/s)
398,089	2916,48	5,56	14.002

Perhitungan laju kalor spesifikasi menggunakan data desain awal dari pabrik pembuat boiler Takuma 600 SA, dengan tekanan uap kering sebesar 23 bar, suhu air umpan masuk berkisar 95°C, suhu uap kering 260°C, dan kapasitas aliran uap sebesar 20 ton/jam. Berdasarkan persamaan (1), diperoleh nilai entalpi fluida masuk (h_{in}) sebesar 398,089 kJ/kg dan entalpi fluida keluar (h_{out}) sebesar 2916,48 kJ/kg. Dengan laju aliran massa uap (m) sebesar 5,56 kg/s, maka laju kalor teoritis ideal yang seharusnya dihasilkan adalah sebesar 14.002 kJ/s..

3.2 Analisa Laju Kalor Berdasarkan Data Oprasional

Berdasarkan data harian operasional selama 5 hari (Tabel 4 dan Tabel 5), ditemukan bahwa laju kalor nyata rata-rata mengalami fluktuasi signifikan, berkisar antara 12.787 kJ/s hingga 13.867 kJ/s. Fluktuasi ini menunjukkan bahwa dalam kondisi riil di lapangan, laju kalor aktual tidak pernah mencapai standar spesifikasi desain awal sebesar 14.002 kJ/s.

Tabel 4. Hasil Perhitungan Laju Kalor Berdasarkan Data Oprasional

Hari	h_{in} (kJ/kg)	h_{out} (kJ/kg)	m (kg/s)	Q (kJ/s)
1	314,030	3006,06	4,75	12.787
2	301,449	3011,01	5,08	13.765
3	305,642	3015,05	5,10	13.818
4	318,225	3010,86	5,15	13.867
5	330,814	3009,07	5,13	13.739
5	330,814	3009,07	5,13	13.739

Fenomena ini dapat dijelaskan melalui Hukum Pertama Termodinamika mengenai kekekalan energi, di mana energi kalor yang masuk dari hasil pembakaran bahan bakar (cangkang dan serabut) dikonversi menjadi energi dalam fluida kerja (air menjadi uap). Namun, laju perpindahan panas konveksi dan konduksi dari ruang bakar ke pipa-pipa air (*water tube*) sangat dipengaruhi oleh resistansi termal material pipa. Berkurangnya nilai laju kalor nyata mengindikasikan adanya rugi-rugi kalor (*heat losses*) yang besar, baik akibat pembakaran yang tidak sempurna (*incomplete combustion*) di ruang bakar maupun akibat tingginya tahanan termal pada dinding pipa penukar panas.

3.3 Analisa Efisiensi dan Laju Kalor Berdasarkan Data Oprasional

Berikut hasil perhitungan efisiensi boiler berdasarkan data oprasional yang dilaksanakan selama 5 hari.

Tabel 5. Hasil Perhitungan Efisiensi Boiler Berdasarkan Data Oprasional

Hari	W_s	Laju Kalor	Efisiensi %
1	17.091	12.787	38,90
2	18.273	13.765	41,86
3	18.364	13.818	42,07
4	18.545	13.867	42,22
5	18.455	13.739	41,79

Data pada Tabel 5 memperlihatkan hubungan berbanding lurus antara laju kalor, jumlah produksi uap (W_s), dan efisiensi termal boiler. Efisiensi terendah terjadi pada hari pertama yaitu 38,90%

dengan produksi uap hanya 17,091 ton/jam. Sebaliknya, efisiensi tertinggi dicapai pada hari ke-4 sebesar 42,22% dengan produksi uap mencapai 18,545 ton/jam. Secara ilmiah, efisiensi boiler sangat bergantung pada rasio udara-bahan bakar (*air-fuel ratio*) dan nilai kalor pembakaran rendah (*Low Heating Value / LHV*) dari biomassa cangkang dan fiber. Berdasarkan teori efisiensi termal sistem pembangkit, variasi efisiensi operasional (38,90% – 42,22%) yang tergolong rendah ini disebabkan oleh fluktuasi temperatur air umpan (*feed water*) dan tekanan superheater. Ketika temperatur air umpan masuk terlalu rendah di bawah standar desain (90-95°C), boiler membutuhkan energi kalor pembakaran yang jauh lebih besar hanya untuk mencapai titik didihnya (*sensible heat*), sehingga menurunkan porsi energi yang digunakan untuk penguapan ekstrim (*latent heat*) Akibatnya, efisiensi termal menurun drastis. Produksi tertinggi terjadi pada efisiensi maksimum, sedangkan produksi terendah bertepatan dengan efisiensi minimum, yang mengindikasikan keterkaitan langsung antara efisiensi pembakaran dan *output* uap yang dihasilkan, dimana semakin tinggi jumlah uap yang dihasilkan, maka efisiensi juga semakin tinggi [12].

Faktor yang mempengaruhi efisiensi boiler adalah tekanan *superheater*, temperatur air umpan, temperatur uap, jumlah uap yang dihasilkan, jumlah konsumsi bahan bakar, dan nilai kalor pembakaran bahan bakar. Boiler mempunyai peranan penting dalam proses produksi uap maka dari itu peningkatan efisiensi boiler sangat penting guna mendapatkan *output* yang baik [13].

3.4 Analisa Kegagalan Laju Kalor Di Boiler Berdasarkan FMEA

Analisa dengan pendekatan Failure Modes and Effect Analysis (FMEA) menggunakan data mengenai faktor-faktor yang berpotensi menjadi penyebab kegagalan laju kalor pada boiler, sebagaimana disajikan berikut:

Tabel 6. Penentuan Nilai *Severity*, *Occurrence*, *detection* dan RPN

Mode Kegagalan	S	O	D	RPN
Pipa boiler bocor	5	2	3	30
Timbulnya <i>scalling</i> /kerak pada pipa-pipa	4	4	4	64
Frekuensi blowdown tidak sesuai	3	4	2	24
kurangnya suplai panas pada air umpan	3	4	2	24
Kualitas bahan bakar buruk	2	2	2	8
Total				150

Metode *Failure Modes and Effect Analysis* (FMEA) digunakan dengan mengevaluasi tiga parameter utama secara kualitatif-kuantitatif: *Severity* (S/tingkat keparahan dampak), *Occurrence* (O/tingkat keseringan munculnya kegagalan), dan *Detection* (D/tingkat kemudahan mendeteksi kegagalan sebelum berdampak ke sistem). Perkalian ketiga parameter ini menghasilkan *Risk Priority Number* (RPN) berdasarkan persamaan (3).

Dalam teori manajemen risiko teknik, titik kritis (*critical threshold*) RPN ditetapkan sebesar 30. Nilai RPN yang melampaui angka 30 diklasifikasikan sebagai Risiko Tinggi hingga Sangat Tinggi yang dapat memicu *downtime* total (*catastrophic failure*) dan membutuhkan mitigasi engineering segera. Berdasarkan hasil pembobotan pada Tabel 6, ditemukan dua mode kegagalan utama yang berada di atas atau tepat pada batas kritis tersebut.

Mode kegagalan dengan nilai RPN tertinggi adalah Timbulnya *scalling*/kerak pada pipa-pipa Uap dengan nilai 64. Hal ini menunjukkan bahwa kegagalan ini memiliki risiko yang sangat tinggi dan perlu mendapatkan perhatian utama dalam upaya mitigasi, karena dapat menyebabkan kehilangan tekanan uap serta energi yang

berdampak langsung pada efisiensi boiler [14]. Mode kegagalan dengan RPN kedua tertinggi adalah Pipa boiler bocor dengan nilai 30. Kegagalan ini dapat menyebabkan penurunan efisiensi panas, meningkatkan konsumsi bahan bakar, serta berpotensi merusak komponen boiler jika tidak segera ditangani .

Frekuensi blowdown yang tidak sesuai dan kegagalan suplai panas pada air umpan memiliki RPN sebesar 24. Kegagalan ini dapat menyebabkan penumpukan padatan dalam boiler, yang berdampak pada penurunan laju kalor dan efisiensi sistem secara keseluruhan. Blowdown penting untuk melindungi permukaan penukar panas pada boiler [15]. Mode kegagalan berikut yang memiliki nilai RPN terendah yaitu kualitas bahan bakar buruk, dengan nilai RPN sebesar 8, Meskipun tergolong mode kegagalan rendah, kegagalan ini tetap berkontribusi terhadap penurunan efisiensi pembakaran dan peningkatan konsumsi bahan bakar.

3.5 Alternatif Solusi

Berdasarkan hasil identifikasi risiko dan perhitungan nilai *Risk Priority Number* (RPN) pada sistem boiler, ditemukan beberapa potensi kegagalan yang memiliki nilai prioritas risiko tinggi. Untuk mengurangi kemungkinan terjadinya kegagalan serta dampaknya, berikut disusun alternatif solusi pencegahan, deteksi, dan perbaikan untuk setiap risiko yang telah diidentifikasi [16]. Berikut daftar risiko kegagalan dan solusi yang dapat dilakukan untuk mengurangi risiko terjadinya kegagalan.

Tabel 7. Alternatif Solusi

Risiko Kegagalan	Alternatif Solusi
Timbulnya <i>Scaling</i> /Kerak pada pipa	Melakukan <i>chemical cleaning</i> dan <i>water treatment</i> secara rutin untuk mencegah pembentukan kerak, serta mengontrol kualitas

	air pengisi boiler agar sesuai standar.
Pipa boiler bocor	Menjalankan inspeksi berkala dengan metode NDT (<i>Non-Destructive Testing</i>) serta segera melakukan perbaikan atau penggantian pada pipa yang mengalami degradasi material.
Frekuensi blowdown Tidak sesuai	Menyusun prosedur operasi standar (SOP) blowdown dan memberikan pelatihan kepada operator agar frekuensinya optimal dalam menjaga kualitas air boiler.
Kegagalan suplai panas pada air umpan	Melakukan kalibrasi dan pemeliharaan rutin pada burner dan sistem pembakaran untuk menjamin kestabilan suplai panas.
Kualitas bahan bakar buruk	Menetapkan standar minimum kualitas bahan bakar dan melakukan pengujian kualitas secara berkala.

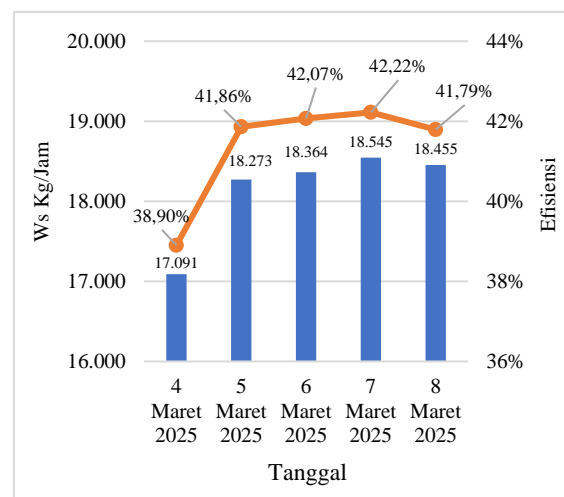
Solusi utama untuk risiko tertinggi (RPN 64) berfokus pada pengendalian kimia air. Berdasarkan prinsip termodinamika kimia, pembentukan kerak kalsium sulfat (CaSO_4) atau kalsium karbonat (CaCO_3) bersifat *retrograde solubility*, yaitu kelarutannya justru menurun ketika temperatur air meningkat. Oleh karena itu, area pipa penguap menjadi lokasi yang paling rentan timbul kerak.

Mitigasi melalui injeksi bahan kimia fungsional (seperti senyawa polimer akrilat) bekerja dengan cara mendistorsi kisi kristal mineral yang akan mengendap, menjaganya tetap dalam bentuk lumpur halus (*sludge*) yang tidak menempel pada dinding pipa. Lumpur ini kemudian dibuang secara mekanis melalui sistem blowdown yang terjadwal. Penentuan frekuensi blowdown

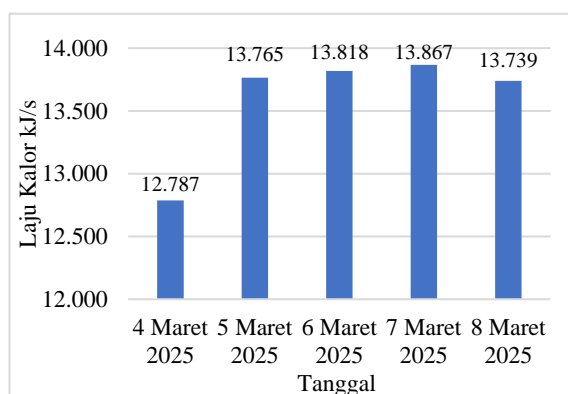
tidak boleh dilakukan secara insting, melainkan harus didasarkan pada rumus keseimbangan massa TDS air boiler, agar kehilangan energi panas (*heat loss*) akibat pembuangan air panas tidak menurunkan efisiensi termal boiler secara drastic

Penerapan pengujian NDT dengan *Ultrasonic Testing* (UT) memanfaatkan prinsip perambatan gelombang akustik frekuensi tinggi melintasi penampang logam pipa. Ketika gelombang mengenai batas dinding dalam pipa yang telah menipis atau berongga akibat korosi internal, waktu pantul gelombang (*time-of-flight*) akan berubah.

Grafik Hubungan Laju Kalor, Efisiensi dan Produksi Uap



Gambar 1. Hubungan Produksi Uap dan Efisiensi



Gambar 2. Rekapitulasi Laju Kalor

3. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian, pengolahan data operasional, dan analisis risiko yang telah dilakukan pada sistem *water tube boiler* Takuma 600 SA berkapasitas 60 ton/jam, dapat disimpulkan bahwa laju kalor nyata operasional harian boiler mengalami kegagalan untuk mencapai standar spesifikasi desain idealnya sebesar 14.002 kJ/s. Laju kalor aktual yang dihasilkan selama masa pemantauan terbukti berfluktuasi secara dinamis dengan nilai terendah sebesar 12.787 kJ/s dan nilai tertinggi hanya mencapai 13.867 kJ/s. Fenomena degradasi energi ini berjalan linear dengan fluktuasi efisiensi termal boiler yang tergolong rendah, yaitu berkisar antara 38,90% hingga 42,22%. Penurunan laju kalor dan efisiensi termal tersebut secara langsung mengakibatkan penurunan kapasitas produksi output uap aktual pabrik, sehingga pasokan energi kalor ke setiap stasiun pengolahan kelapa sawit menjadi tidak optimal.

Melalui penerapan metode *Failure Modes and Effect Analysis* (FMEA) dengan mengevaluasi parameter *severity*, *occurrence*, dan *detection*, berhasil diidentifikasi lima mode kegagalan sistem yang menjadi faktor pemicu utama merosotnya performa laju kalor tersebut. Dari hasil analisis risiko, ditemukan dua mode kegagalan kritis yang memiliki nilai *Risk Priority Number* (RPN) tertinggi dan melampaui batas ambang kritis risiko tinggi ($RPN \geq 30$). Mode kegagalan prioritas pertama adalah timbulnya kerak (*scaling*) pada pipa-pipa uap dengan nilai RPN sebesar 64. Secara ilmiah, lapisan kerak ini bertindak sebagai isolator termal dengan konduktivitas rendah yang menghambat laju perpindahan panas konduksi secara radial dari ruang bakar ke fluida kerja. Mode kegagalan kritis kedua adalah kebocoran pipa boiler dengan nilai RPN sebesar 30, yang dinilai sangat berbahaya karena memiliki skor keparahan (*severity*) maksimal yang berdampak fatal pada

hilangnya massa uap, penurunan tekanan drastis, serta ancaman terhadap keselamatan kerja operasional.

Sebagai langkah mitigasi keteknikan untuk memulihkan keandalan laju kalor dan efisiensi boiler, penelitian ini merekomendasikan integrasi solusi terpadu berbasis manajemen perawatan. Untuk mengatasi risiko tertinggi akibat pembentukan kerak, perlu dilakukan kontrol kualitas air pengisi secara ketat melalui kombinasi *external treatment* (menggunakan *softener tank* dan deaerator) serta internal treatment berupa injeksi bahan kimia fungsional, yang didukung dengan pelaksanaan pembersihan kimia (*chemical cleaning*) secara berkala. Sementara itu, untuk memitigasi kebocoran pipa, direkomendasikan penerapan pemeliharaan prediktif melalui pengujian non-destruktif berbasis *Non-Destructive Testing* (NDT) jenis *Ultrasonic Testing* (UT) secara periodik. Metode ini efektif untuk mengukur sisa ketebalan dinding pipa akibat korosi dan erosi gas buang, sehingga penggantian segmen material yang mengalami degradasi dapat dilakukan lebih awal sebelum terjadi kegagalan fatal atau penutupan pabrik secara mendadak.

Referensi

- [1] Andika, W., Mulyara, B., Effendi, Z., dan Sembiring, A. S. (2023). Analisa Kehilangan Panas Secara Konduksi Pada Saluran Steam (Pipa) Dari Turbin Ke *Back Pressure Vessel* (BPV) Pada Pabrik Kelapa Sawit (PKS) Kapasitas 45 Ton/Jam. *Jurnal Agro Fabrica*, 5(2), 77–89.
- [2] Laila, L. (2024). Kajian Perhitungan Neraca Energi Pada Unit Boiler Untuk Menentukan Kebutuhan Energi (Studi Kasus) di PT. Ciptamas Bumi Selaras–Pabrik Kelapa Sawit Nasal. *Jurnal Vokasi Teknologi Industri (JVTI)*, 6(1), 1–11.

- [3] Utami, A. D. P., dan Aswan, A. (2016). *Prototype Steam Power Plant (Analisis Heat Loss Pada Unit Boiler Furnace Dan Superheater)*. *Kinetika*, 7(1),1-4.
- [4] Effendi, Z., Aisyah, S., dan Lubis, M. F. A. (2023). Analisa Efektifitas *Blowdown Rate* Dan *Blowdown Time* Pada Boiler Kapasitas 20 Ton/Jam. *Jurnal Teknologi Pertanian*, 12(2), 68–81.
- [5] Ghifari, R. H., Nur, M., dan Umam, M. I. H. (2025). *Performance Efficiency Analysis Of Water Tube Boiler Machine Using Input Output Method And FMEA*. *Jurnal Perangkat Lunak*, 7(1), 32–44.
- [6] Effendi, Z., dan Nainggolan, A. F. (2020). Analisa Kehilangan Energi Pada Boiler Pabrik Kelapa Sawit *Energy Loss Analysis On The Palm Oil Mill Boiler*. *Jurnal Agro Fabrica*, 2(1), 30–37.
- [7] Sinaga, K. P. (2024). Studi Tentang Modul Kontroller KS 94 Sebagai Pengontrol Air di Boiler Pada PLTU PT. GROWTH ASIA 2 X 15 MW. *Jurnal Ilmiah Tenaga Listrik*, 3(2), 71–78.
- [8] Syaiful, R. (2019). Perawatan Dan Perbaikan Burner Pembakar Ketel Untuk Memaksimalkan Produksi Uap Di Km. Binaiya Pt. Pelni. Karya Tulis. 1-15.
- [9] Imam, S. (2017). Analisis Pengaruh Variasi Kondisi Pendistribusian Laju Aliran Massa Uap Ke Pabrik II Dan III Terhadap Unjuk Kerja Siklus Rankine Unit Batubara (Ubb) Pt. Petrokimia Gresik, 2(1), 20-35.
- [10] Roni, K. A., Elfidiah, E., Widaputra, Y., & Dewi, D. K. (2021). Analisis pengaruh rasio serabut dan cangkang kelapa sawit sebagai bahan bakar pada boiler. *Jurnal Redoks*, 6(1), 1–6.
- [11] Sukania, I. W., dan Wijaya, C. (2022). Analisis Sistem Perawatan Mesin Produksi Menggunakan Metode FMEA di PT. X. *Jurnal Energi Dan Manufaktur*, 15(2), 103–111.
- [12] Baringbing, M. H., dan Sinaga, N. (2023). Analisis Efisiensi *Water Tube Boiler* Menggunakan Metode Langsung di PT. Toba Pulp Lestari, Tbk Porsea-Sumatera Utara. *Jurnal Teknik Mesin*, 11(2), 49–68.
- [13] Shahab, A., and Amna, S. (2023). *Efficiency analysis of fire tube boiler type at refinery utility unit center for oil and gas human resources developme*. *Jurnal Cakrawala Ilmiah*, 2(7), 3109–3118.
- [14] Mahyunis, M., Effendi, Z., & Asrianto, F. (2023). Analisa Risiko Kecelakaan Kerja Di Stasiun Boiler Pada PT XYZ Dengan Menggunakan Metode HIRARC. *IRA Jurnal Teknik Mesin Dan Aplikasinya (IRAJTMA)*, 2(2), 37–46.
- [15] Aisyah, S. A., Effendi, Z., & Maha, D. V. (2021). Aplikasi Interpolasi Lagrange terhadap Efisiensi Turbin pada Pabrik Kelapa Sawit Mayang Kapasitas 40 Ton/Jam. *Agrointek: Jurnal Teknologi Industri Pertanian*, 15(1), 171–176.
- [16] Raja, P. M., Effendi, Z., dan Lase, C. A. (2022). Upaya Peningkatan *Performance* Mesin *Screw Press* Berdasarkan Nilai *Idling* Dan *Minor Stoppages* Dan *Reduced Speed* Di Pabrik Kelapa Sawit Kapasitas 30 Ton. *Jurnal Agro Fabrica*, 4(2), 60–73.