Jurnal Teknik Mesin S-1, Vol. 14, No. 3, Tahun 2026
Online: https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/jtm

ANALISIS KEHANDALAN DAN *RISK BASED INSPECTION* PADA *HEAT RECOVERY BOILER* PSEL DENGAN METODE *FAILURE MODE AND EFFECTS ANALYSIS (FMEA)* DAN *FISHBONE DIAGRAM*

Arkan Bimo Alkautsar[1], Gunawan Dwi Haryadi[2], Yusuf Umardani[2]
[1]Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro
[2]Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Sudharto, SH., Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62247460059
E-mail: arkanbimo@students.undip.ac.id

Abstrak

Heat Recovery Boiler (HRB) merupakan salah satu komponen utama pada sistem Pembangkit Listrik Tenaga Sampah (PSEL) yang berfungsi memanfaatkan energi panas hasil proses pembakaran sampah menjadi energi uap untuk menggerakkan turbin dan generator dalam menghasilkan listrik. Keandalan *Heat Recovery Boiler* sangat menentukan kontinuitas operasi pembangkit karena komponen ini bekerja pada temperatur dan tekanan tinggi serta terpapar gas hasil pembakaran yang mengandung senyawa korosif. Kondisi tersebut menyebabkan komponen boiler rentan mengalami kerusakan, seperti korosi, erosi, penipisan dinding pipa, kebocoran, maupun kegagalan material yang dapat mengakibatkan penurunan efisiensi hingga terjadinya *unplanned shutdown*. Oleh karena itu, diperlukan strategi pemeliharaan dan inspeksi yang mampu mengidentifikasi serta memprioritaskan risiko kegagalan secara sistematis. Penelitian ini bertujuan mengidentifikasi komponen kritis pada *Heat Recovery Boiler*, menganalisis tingkat risiko kegagalan menggunakan metode *Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA), mengidentifikasi akar penyebab kegagalan melalui *Fishbone Diagram*, serta menyusun strategi inspeksi berbasis risiko menggunakan metode *Risk-Based Inspection* (RBI). Hasil analisis *Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA) menunjukkan bahwa komponen *Water Wall Tube* memiliki nilai *Risk Priority Number* (RPN) tertinggi sehingga ditetapkan sebagai komponen dengan tingkat prioritas risiko paling tinggi. Analisis *Fishbone Diagram* menunjukkan bahwa penyebab kegagalan dipengaruhi oleh faktor manusia, mesin, metode, material, pengukuran, dan lingkungan yang saling berkaitan. Selanjutnya, penerapan *Risk-Based Inspection* (RBI) mengelompokkan komponen berdasarkan tingkat risiko sehingga dapat digunakan sebagai dasar dalam menentukan prioritas inspeksi, metode inspeksi yang sesuai, serta frekuensi inspeksi yang optimal. Penerapan pendekatan *Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA), *Fishbone Diagram*, dan *Risk-Based Inspection* (RBI) diharapkan mampu meningkatkan keandalan *Heat Recovery Boiler*, meminimalkan potensi kegagalan, mengurangi risiko *unplanned shutdown*, serta mendukung keberlangsungan operasi PSEL secara aman, efektif, dan efisien.

Kata Kunci: *heat recovery boiler*; risiko kegagalan

Abstract

Heat Recovery Boiler (HRB) is one of the main components of a Waste-to-Energy (WtE) power plant system, functioning to recover thermal energy generated from municipal solid waste combustion and convert it into steam to drive turbines and generators for electricity generation. The reliability of the Heat Recovery Boiler plays a crucial role in ensuring continuous plant operation because it operates under high-temperature and high-pressure conditions while being continuously exposed to corrosive flue gases. These operating conditions increase the likelihood of component failures, including corrosion, erosion, tube wall thinning, leakage, and material degradation, which may reduce boiler efficiency and lead to unplanned shutdowns. Therefore, an effective maintenance and inspection strategy is required to systematically identify and prioritize potential failure risks. This study aims to identify the critical components of the Heat Recovery Boiler, evaluate failure risks using the Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) method, determine the root causes of failures through the Fishbone Diagram, and develop a risk-based inspection strategy using Risk-Based Inspection (RBI). The FMEA results indicate that the Water Wall Tube has the highest Risk Priority Number (RPN), making it the most critical component requiring priority maintenance. The Fishbone Diagram analysis reveals that failures are influenced by interconnected human, machine, method, material, measurement, and environmental factors. Furthermore, the implementation of Risk-Based Inspection (RBI) classifies components according to their risk levels, providing a basis for determining inspection priorities, appropriate inspection methods, and optimal inspection intervals. The integration of FMEA, the Fishbone Diagram, and RBI is expected to improve the reliability of the Heat Recovery Boiler, minimize potential failures, reduce the risk of unplanned shutdowns, and support safe, effective, and sustainable operation of Waste-to-Energy power plants..

***Keywords**: failure risk; heat recovery boiler*

1. Pendahuluan

Peningkatan Peningkatan jumlah sampah perkotaan menjadi salah satu tantangan utama dalam pengelolaan lingkungan. Salah satu teknologi yang banyak dikembangkan untuk mengatasi permasalahan tersebut adalah *Waste-to-Energy* (WtE) atau *Pembangkit Listrik Tenaga Sampah* (PSEL), yaitu sistem yang memanfaatkan energi panas hasil pembakaran sampah untuk menghasilkan energi listrik [1]. Pada sistem ini, *Heat Recovery Boiler* (HRB) berperan sebagai komponen utama yang mengubah energi panas dari gas buang hasil pembakaran menjadi uap bertekanan tinggi untuk menggerakkan turbin dan generator [2].

Kinerja *Heat Recovery Boiler* sangat dipengaruhi oleh kondisi operasi yang melibatkan temperatur tinggi, tekanan tinggi, serta paparan gas buang yang mengandung senyawa korosif seperti klorin, sulfur, dan partikel *fly ash*. Kondisi tersebut dapat menyebabkan berbagai mekanisme degradasi material, seperti korosi temperatur tinggi, erosi, *fouling*, *slagging*, *creep*, hingga *tube leakage*. Apabila tidak ditangani dengan baik, kerusakan pada komponen boiler dapat menurunkan efisiensi perpindahan panas, meningkatkan biaya pemeliharaan, bahkan menyebabkan *unplanned shutdown* yang mengganggu kontinuitas operasi pembangkit [3].

Untuk meminimalkan risiko tersebut, diperlukan metode yang mampu mengidentifikasi komponen kritis serta menentukan prioritas penanganan secara sistematis. Salah satu metode yang banyak digunakan adalah *Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA), yaitu metode analisis yang mengevaluasi potensi kegagalan berdasarkan tingkat keparahan (*Severity*), peluang terjadinya (*Occurrence*), dan kemampuan deteksi (*Detection*) sehingga menghasilkan nilai *Risk Priority Number* (RPN) sebagai dasar penentuan prioritas risiko [4]. Namun, FMEA belum mampu menjelaskan faktor-faktor yang menjadi penyebab utama terjadinya kegagalan.

Untuk melengkapi hasil analisis FMEA, penelitian ini menggunakan *Fishbone Diagram* guna mengidentifikasi akar penyebab kegagalan berdasarkan aspek manusia, mesin, metode, material, pengukuran, dan lingkungan. Selanjutnya, hasil analisis tersebut diintegrasikan dengan pendekatan *Risk-Based Inspection* (RBI) untuk menentukan prioritas inspeksi berdasarkan tingkat risiko masing-masing komponen. Pendekatan RBI mengombinasikan *Probability of Failure* (PoF) dan *Consequence of Failure* (CoF) sehingga inspeksi dapat difokuskan pada komponen yang memiliki risiko tertinggi [5].

Penelitian ini bertujuan mengidentifikasi komponen kritis pada *Heat Recovery Boiler*, menganalisis tingkat risiko kegagalan menggunakan metode FMEA, menentukan akar penyebab kegagalan melalui *Fishbone Diagram*, serta menyusun strategi inspeksi berbasis risiko menggunakan RBI. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi acuan dalam penyusunan program inspeksi dan pemeliharaan yang lebih efektif sehingga keandalan *Heat Recovery Boiler* dapat ditingkatkan dan potensi gangguan operasi pada PSEL dapat diminimalkan.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini Penelitian ini menggunakan pendekatan deskriptif dengan metode analisis risiko untuk mengidentifikasi komponen kritis pada *Heat Recovery Boiler System* di *Pembangkit Listrik Tenaga Sampah* (PSEL). Data penelitian diperoleh melalui studi literatur yang mencakup jurnal ilmiah, standar internasional, buku referensi, serta laporan teknis yang berkaitan dengan sistem boiler, mekanisme kegagalan, dan metode analisis risiko [6].

Tahapan penelitian diawali dengan identifikasi komponen utama *Heat Recovery Boiler*, yaitu *Water Wall Tubes, Superheater Tubes, Economizer Tubes, Steam Drum, Riser Tubes,* dan *Downcomer*. Selanjutnya, dilakukan identifikasi mode kegagalan, penyebab kegagalan, dan dampak yang ditimbulkan pada setiap komponen berdasarkan data dari literatur dan referensi teknis [7].

Analisis risiko dilakukan menggunakan metode *Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA). Setiap mode kegagalan dinilai berdasarkan tiga parameter, yaitu *Severity* (S), *Occurrence* (O), dan *Detection* (D). Ketiga parameter tersebut digunakan untuk menghitung nilai *Risk Priority Number* (RPN) menggunakan Persamaan (1).

$$\boxed{RPN = S \times O \times D} \qquad (1)$$

dengan:

- **RPN** = *Risk Priority Number*;
- **S** = *Severity* (tingkat keparahan dampak);
- **O** = *Occurrence* (peluang terjadinya kegagalan);
- **D** = *Detection* (kemampuan mendeteksi kegagalan).

Komponen dengan nilai RPN tertinggi kemudian dianalisis menggunakan *Fishbone Diagram* untuk mengidentifikasi akar penyebab kegagalan berdasarkan enam aspek, yaitu *man, machine, method, material, measurement,* dan *environment*. Analisis ini digunakan sebagai dasar dalam penyusunan tindakan perbaikan dan pengendalian risiko [8].

Selanjutnya, hasil analisis FMEA diintegrasikan dengan metode *Risk-Based Inspection* (RBI). Nilai *Occurrence* (O) digunakan sebagai dasar penentuan *Probability of Failure* (PoF), sedangkan nilai *Severity* (S) digunakan sebagai dasar penentuan *Consequence of Failure* (CoF). Kedua parameter tersebut dikonversi ke dalam skala risiko 1–5 dan dipetakan pada matriks risiko 5×5 untuk menentukan kategori risiko setiap komponen. Tingkat risiko dihitung menggunakan Persamaan (2).

$$\boxed{Risk = PoF \times CoF} \qquad (2)$$

Hasil klasifikasi risiko digunakan untuk menyusun prioritas inspeksi, menentukan metode inspeksi, serta menetapkan interval inspeksi yang sesuai dengan tingkat risiko masing-masing komponen *Heat Recovery Boiler* [9].

Alur penelitian secara keseluruhan meliputi studi literatur, identifikasi komponen, analisis FMEA, analisis *Fishbone Diagram*, penerapan *Risk-Based Inspection* (RBI), serta penyusunan rekomendasi inspeksi dan pemeliharaan berbasis risiko.

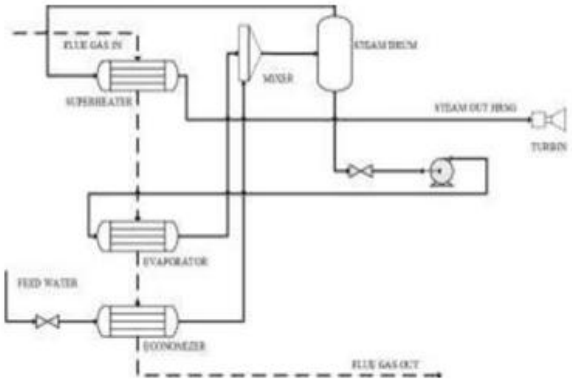
3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Sistem *Heat Recovery Boiler* pada PSEL

Heat Recovery Boiler (HRB) merupakan komponen utama pada sistem Pembangkit Listrik Tenaga Sampah (PSEL) yang berfungsi memanfaatkan energi panas dari gas hasil pembakaran sampah (flue gas) untuk menghasilkan uap bertekanan tinggi sebagai penggerak turbin uap dan generator [10]. Pada sistem ini, sampah dibakar di dalam furnace menggunakan sistem moving grate sehingga menghasilkan gas panas yang kemudian dialirkan menuju HRB. Energi panas dari gas buang tersebut dipindahkan ke air melalui proses perpindahan panas hingga menghasilkan uap yang digunakan dalam siklus pembangkitan listrik [11].

HRB pada PSEL umumnya menggunakan tipe water tube boiler, di mana air mengalir di dalam pipa sedangkan gas panas mengalir di bagian luar pipa. Konfigurasi ini dipilih karena mampu beroperasi pada temperatur dan tekanan tinggi serta memiliki efisiensi perpindahan panas yang baik. Komponen utama penyusun sistem terdiri atas Water Wall Tubes, Steam Drum, Downcomer, Riser Tubes, Superheater, dan Economizer, yang bekerja secara terintegrasi dalam proses pembentukan uap [12]. Air umpan (feedwater) terlebih dahulu dipanaskan di economizer sebelum memasuki steam drum. Selanjutnya, air bersirkulasi melalui downcomer menuju water wall tubes untuk menyerap panas hasil pembakaran hingga berubah menjadi campuran air dan uap. Campuran tersebut dipisahkan di steam drum, kemudian uap jenuh dialirkan ke superheater untuk dipanaskan menjadi superheated steam sebelum digunakan sebagai fluida kerja pada turbin. Sementara itu, gas buang terus dimanfaatkan secara bertahap hingga keluar menuju sistem pengolahan gas buang sehingga energi panas dapat dimanfaatkan secara optimal [11].

Karakteristik sampah yang heterogen menyebabkan kondisi operasi HRB lebih kompleks dibandingkan boiler konvensional. Kandungan klorin, sulfur, dan partikel fly ash dapat mempercepat terjadinya korosi, erosi, fouling, slagging, serta tube leakage pada komponen boiler. Kondisi tersebut berpotensi menurunkan efisiensi perpindahan panas dan meningkatkan risiko penghentian operasi secara tidak terencana (unplanned shutdown). Oleh karena itu, identifikasi komponen kritis dan penerapan strategi inspeksi berbasis risiko menjadi langkah penting untuk menjaga keandalan sistem Heat Recovery Boiler [13].



Gambar 1. Sistem Heat Recovery Boiler

3.2. Data Kerusakan Komponen Heat Recovery Boiler

Data kerusakan pada penelitian ini diperoleh dari studi literatur, standar teknis, dan referensi yang membahas kegagalan komponen *Heat Recovery Boiler*. Komponen yang dianalisis meliputi *Water Wall Tubes, Superheater Tubes, Economizer Tubes, Steam Drum, Riser Tubes,* dan *Downcomer* karena beroperasi pada kondisi temperatur dan tekanan tinggi sehingga berpotensi mengalami kegagalan yang memengaruhi kinerja boiler [14].

Kerusakan yang umum terjadi meliputi korosi temperatur tinggi, erosi akibat *fly ash*, *fouling*, *slagging*, *thermal fatigue*, *creep*, dan *tube leakage*. Mekanisme tersebut dapat menurunkan efisiensi perpindahan panas, mengganggu proses pembentukan uap, hingga menyebabkan *unplanned shutdown* apabila tidak ditangani melalui inspeksi dan pemeliharaan yang tepat [15].

Data mode kegagalan setiap komponen yang digunakan sebagai dasar analisis FMEA disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Data Historis Kerusakan Komponen *Heat Recovery Boiler*

No.	Komponen	Failure Mode	Penyebab Kegagalan	Dampak Terhadap Sistem	Frekuensi Kejadian
1	*Water Wall Tubes*	Tube Leakage	Korosi, erosi abu, penipisan material	Kebocoran uap, penurunan tekanan, shutdown boiler	5 kali/tahun
2	*Water Wall Tubes*	Erosi (erosion thinning)	Tumbukan partikel fly ash	Penurunan ketebalan pipa dan risiko kebocoran	4 kali/tahun
3	*Superheater Tubes*	Creep	Temperatur tinggi dalam waktu lama	Deformasi pipa dan risiko *tube rupture*	3 kali/tahun
4	*Superheater Tubes*	Overheating	Temperatur melebihi batas operasi	Kerusakan material dan gangguan produksi uap	2 kali/tahun
5	*Economizer Tubes*	Fouling	Penumpukan abu pada tube	Penurunan perpindahan panas dan efisiensi boiler	4 kali/tahun
6	*Steam Drum*	Korosi Internal	Kualitas air boiler buruk	Penurunan kekuatan dan keandalan drum	1 kali/tahun
7	*Riser Tubes*	Thermal Fatigue	Korosi dan thermal fatigue	Gangguan sirkulasi air uap	2 kali/tahun
8	*Downcomer*	Korosi	Kualitas air dan oksidasi material	Penipisan pipa dan risiko kebocoran	1 kali/tahun

3.3. Hasil Analisis dengan Metode *Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA)

Analisis *Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA) dilakukan untuk mengevaluasi tingkat risiko kegagalan pada setiap komponen *Heat Recovery Boiler*. Penilaian dilakukan berdasarkan tiga parameter, yaitu *Severity* (S), *Occurrence* (O), dan *Detection* (D). Ketiga parameter tersebut dikalikan untuk memperoleh nilai *Risk Priority Number* (RPN), yang digunakan sebagai dasar dalam menentukan prioritas penanganan setiap mode kegagalan [16].

Hasil analisis menunjukkan bahwa masing-masing komponen memiliki tingkat risiko yang berbeda sesuai dengan fungsi, kondisi operasi, dan mekanisme kerusakan yang dialami. Komponen dengan nilai RPN tertinggi dikategorikan sebagai komponen kritis karena memiliki peluang kegagalan dan dampak yang lebih besar terhadap keandalan *Heat Recovery Boiler*. Nilai RPN yang diperoleh dari setiap komponen disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Komponen Kritis *Heat Recovery Boiler*

No.	Komponen	Failure Mode	S	O	D	RPN
1	*Water Wall Tubes*	Tube Leakage	10	8	5	**400**
2	*Superheater*	Creep	9	7	5	**315**
3	*Economizer*	Fouling	7	7	5	**245**
4	*Water Wall Tubes*	Erosi	8	6	5	**240**
5	*Superheater*	Overheating	8	6	5	**240**
6	*Steam Drum*	Korosi Internal	8	5	5	**200**
7	*Riser Tubes*	Thermal Fatigue	8	5	4	**160**
8	*Downcomer*	Korosi	6	4	4	**96**

Berdasarkan Tabel 1, Hasil analisis menunjukkan bahwa *water wall tube* memiliki nilai RPN tertinggi dibandingkan komponen lainnya sehingga dikategorikan sebagai komponen paling kritis. Mode kegagalan utama yang teridentifikasi adalah *tube leakage* akibat penipisan ketebalan dinding pipa. Selain *water wall tube*, komponen lain seperti *superheater tube* dan *economizer tube* juga memiliki potensi kegagalan, namun nilai RPN yang diperoleh lebih rendah sehingga tingkat prioritas penanganannya berada di bawah *water wall tube*.

Tingginya nilai RPN pada *water wall tube* menunjukkan bahwa komponen tersebut memiliki dampak kegagalan yang besar terhadap kontinuitas operasi *Heat Recovery Boiler*. Apabila terjadi kebocoran pipa, proses pembentukan uap akan terganggu sehingga pembangkit harus dihentikan untuk proses perbaikan. Kondisi tersebut mengakibatkan meningkatnya *downtime*, biaya pemeliharaan, serta penurunan efisiensi pembangkit [18].

3.4. Penentuan Prioritas dan Komponen Kritis

Penentuan komponen kritis dilakukan berdasarkan hasil perhitungan *Risk Priority Number* (RPN) pada analisis FMEA. Nilai RPN diperoleh dari perkalian parameter *Severity* (S), *Occurrence* (O), dan *Detection* (D), sehingga mencerminkan tingkat prioritas risiko dari setiap mode kegagalan yang teridentifikasi [20]. Komponen dengan nilai RPN tertinggi diprioritaskan untuk memperoleh tindakan pemeliharaan dan analisis lebih lanjut karena memiliki potensi memberikan dampak terbesar terhadap keandalan sistem.

Tabel 3. Prioritas dan Komponen Kritis *Heat Recovery Boiler*

No.	Komponen	Failure Mode	RPN	Prioritas
1	*Water Wall Tubes*	Tube Leakage	**400**	**I**
2	*Superheater*	Creep	**315**	**II**
3	*Economizer*	Fouling	**245**	**III**
4	*Water Wall Tubes*	Erosi	**240**	**IV**
5	*Superheater*	Overheating	**240**	**V**
6	*Steam Drum*	Korosi Internal	**200**	**VI**
7	*Riser Tubes*	Thermal Fatigue	**160**	**VII**
8	*Downcomer*	Korosi	**96**	**VIII**

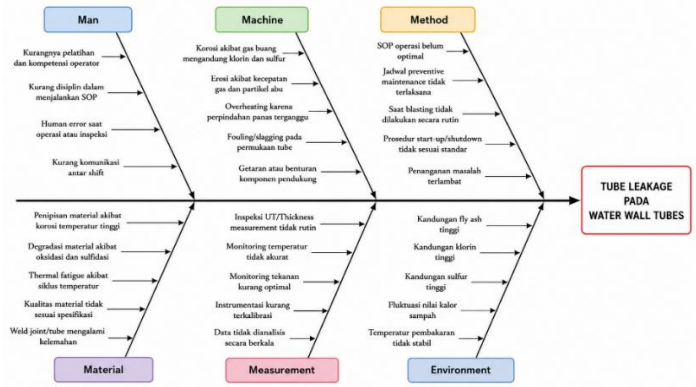
Berdasarkan hasil analisis FMEA, *water wall tube* memiliki nilai RPN tertinggi dibandingkan komponen *Heat Recovery Boiler* lainnya sehingga ditetapkan sebagai komponen paling kritis. Mode kegagalan utama yang teridentifikasi adalah *tube leakage* yang disebabkan oleh penipisan ketebalan dinding pipa akibat korosi, erosi, dan paparan temperatur tinggi selama proses operasi. Kondisi tersebut dapat mengganggu proses pembentukan uap, menurunkan efisiensi perpindahan panas, serta menyebabkan penghentian operasi pembangkit apabila tidak segera ditangani.

Penetapan *water wall tube* sebagai komponen kritis juga mempertimbangkan fungsi komponen tersebut dalam menyerap panas radiasi secara langsung dari ruang bakar. Beban termal yang tinggi, lingkungan operasi yang korosif, serta akumulasi *fly ash* pada permukaan pipa mempercepat proses degradasi material sehingga meningkatkan kemungkinan terjadinya kegagalan. Oleh karena itu, komponen ini dipilih sebagai fokus analisis lanjutan menggunakan *Fishbone Diagram* untuk mengidentifikasi akar penyebab kegagalan dan menyusun rekomendasi tindakan perbaikan yang tepat [17].

Hasil penentuan komponen kritis menunjukkan bahwa pendekatan FMEA efektif digunakan sebagai dasar dalam menentukan prioritas pemeliharaan berdasarkan tingkat risiko. Dengan memusatkan perhatian pada komponen yang memiliki nilai RPN tertinggi, program inspeksi dan pemeliharaan dapat dilakukan secara lebih terarah sehingga potensi kegagalan yang berdampak terhadap keandalan *Heat Recovery Boiler* dapat diminimalkan.

3.5. Analisis *Fishbone Diagram*

Analisis akar penyebab dilakukan menggunakan *Fishbone Diagram* terhadap mode kegagalan *tube leakage* pada *water wall tube*. Analisis ini mengelompokkan penyebab kegagalan ke dalam enam kategori, yaitu *Man*, *Machine*, *Method*, *Material*, *Measurement*, dan *Environment* [21].



Gambar 2. Analisis *Fishbone Diagram* Terhadap Komponen Water Wall Tube

Berdasarkan hasil FMEA, *water wall tube* ditetapkan sebagai komponen paling kritis karena memiliki nilai *Risk Priority Number* (RPN) tertinggi dengan mode kegagalan utama berupa *tube leakage*. Untuk mengetahui faktor-faktor yang menyebabkan terjadinya kegagalan tersebut, dilakukan analisis menggunakan *Fishbone Diagram*. Metode ini mengelompokkan penyebab kegagalan ke dalam enam kategori, yaitu *Man*, *Machine*, *Method*, *Material*, *Measurement*, dan *Environment* [15].

Faktor manusia (*Man*) berkaitan dengan aktivitas operator dan personel pemeliharaan. Kurangnya ketelitian saat inspeksi, keterlambatan dalam mendeteksi indikasi awal kerusakan, serta ketidakkonsistenan dalam pelaksanaan prosedur inspeksi dapat menyebabkan penurunan kondisi pipa tidak teridentifikasi sejak dini. Selain itu, pengalaman dan kompetensi personel juga berpengaruh terhadap efektivitas kegiatan pemeliharaan. Pada aspek mesin (*Machine*), kegagalan dipengaruhi oleh kondisi operasi *Heat Recovery Boiler* yang bekerja secara terus-menerus pada temperatur dan tekanan tinggi. Paparan panas yang berlangsung dalam waktu lama dapat mempercepat penurunan sifat mekanik material. Di sisi lain, korosi, erosi akibat partikel *fly ash*, dan pembentukan deposit pada permukaan pipa menyebabkan ketebalan dinding pipa semakin berkurang sehingga meningkatkan risiko terjadinya *tube leakage* [17].

Faktor metode (*Method*) berhubungan dengan sistem pemeliharaan yang diterapkan. Inspeksi yang masih bersifat periodik tanpa mempertimbangkan tingkat risiko dapat menyebabkan kerusakan berkembang sebelum terdeteksi. Selain itu, prosedur pembersihan deposit dan pengendalian kualitas air boiler yang belum dilakukan secara optimal juga dapat mempercepat proses degradasi material. Penerapan pemeliharaan berbasis risiko (*Risk-Based Maintenance*) menjadi salah satu alternatif untuk meningkatkan efektivitas kegiatan inspeksi [19]. Pada faktor material (*Material*), kualitas material pipa sangat menentukan umur pakai *water wall tube*. Material yang telah mengalami degradasi akibat siklus termal berulang memiliki ketahanan yang lebih rendah terhadap korosi dan erosi. Kandungan senyawa korosif pada gas hasil pembakaran juga mempercepat penipisan dinding pipa sehingga memperbesar kemungkinan terjadinya kebocoran.

Faktor pengukuran (*Measurement*) berkaitan dengan kegiatan pemantauan kondisi komponen. Frekuensi pengukuran ketebalan pipa yang terbatas menyebabkan laju penipisan material sulit diketahui secara akurat. Oleh karena itu, penggunaan metode *Ultrasonic Thickness Testing* (UTT) secara berkala diperlukan untuk memantau perubahan ketebalan pipa sehingga potensi kegagalan dapat dideteksi lebih awal [22]. Sementara itu, faktor lingkungan (*Environment*) dipengaruhi oleh kondisi ruang bakar yang mengandung gas korosif, seperti senyawa klorida dan sulfur, serta partikel *fly ash* yang terbawa bersama gas pembakaran. Kombinasi temperatur tinggi, gas korosif, dan partikel abrasif mempercepat terjadinya korosi dan erosi pada permukaan *water wall tube*. Kondisi lingkungan operasi tersebut menjadikan komponen ini memiliki tingkat kerentanan yang lebih tinggi dibandingkan komponen *Heat Recovery Boiler* lainnya.

Hasil analisis *Fishbone Diagram* menunjukkan bahwa kegagalan *tube leakage* pada *water wall tube* tidak disebabkan oleh satu faktor tunggal, melainkan merupakan kombinasi dari berbagai faktor yang saling berkaitan. Oleh karena itu, upaya mitigasi perlu dilakukan secara menyeluruh melalui peningkatan kompetensi personel, optimalisasi metode inspeksi, pengendalian kualitas air dan kondisi operasi boiler, pemilihan material yang sesuai, serta pemantauan kondisi komponen secara berkala. Pendekatan tersebut diharapkan mampu mengurangi potensi kegagalan dan meningkatkan keandalan *Heat Recovery Boiler* pada PSEL.

3.6. Strategi *Risk-Based Inspection*

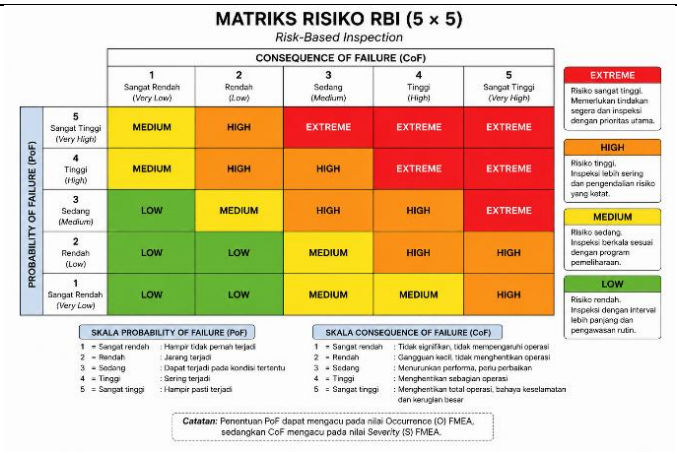
Berdasarkan hasil analisis FMEA, dilakukan penerapan *Risk-Based Inspection* (RBI) untuk menentukan prioritas inspeksi pada setiap komponen *Heat Recovery Boiler*. Dalam penelitian ini, nilai *Probability of Failure* (PoF) ditentukan berdasarkan parameter *Occurrence* (O), sedangkan *Consequence of Failure* (CoF) ditentukan berdasarkan parameter *Severity* (S). Kedua parameter kemudian dikonversi ke dalam skala risiko 1–5 dan dipetakan pada matriks risiko 5×5 sehingga diperoleh kategori risiko masing-masing komponen [23].

Hasil pemetaan menunjukkan bahwa *Water Wall Tubes* berada pada kategori *Extreme* sehingga menjadi prioritas utama dalam pelaksanaan inspeksi. *Superheater Tubes* dan *Economizer Tubes* termasuk kategori *High*, sedangkan *Steam Drum*, *Riser Tubes*, dan *Downcomer* berada pada kategori *Medium*. Klasifikasi tersebut menjadi dasar dalam penentuan metode inspeksi dan interval pemeriksaan yang disesuaikan dengan tingkat risiko setiap komponen.

Tabel 4. Hasil Klasifikasi Risiko Berdasarkan Metode RBI

No.	Komponen	PoF (1-5)	Klasifikasi	Cof (1-5)	Klasifikasi	Status Risiko
1	Water Wall Tube	5	Sangat Tinggi	5	Sangat Tinggi	Extreme
2	Superheater Tube	4	Tinggi	5	Sangat Tinggi	Extreme
3	Economizer Tube	4	Tinggi	4	Tinggi	High
4	Steam Drum	3	Sedang	4	Tinggi	High
5	Downcomer	2	Rendah	3	Sedang	Medium
6	Riser Tube	2	Rendah	2	Rendah	Low

Setelah nilai *Probability of Failure* (PoF) dan *Consequence of Failure* (CoF) ditentukan berdasarkan hasil analisis FMEA, masing-masing nilai dikonversi ke dalam skala risiko 1–5 sesuai dengan pendekatan *Risk-Based Inspection* (RBI). Nilai PoF dan CoF kemudian dipetakan ke dalam matriks risiko 5×5 untuk mengelompokkan setiap komponen berdasarkan tingkat risikonya. Klasifikasi tersebut terdiri atas kategori *Low, Medium, High,* dan *Extreme*, yang digunakan sebagai dasar dalam menentukan prioritas inspeksi, metode inspeksi, serta interval pemeriksaan pada setiap komponen *Heat Recovery Boiler* [23].



Gambar 3. Matriks Risiko RBI 5x5

Hasil pemetaan menunjukkan bahwa komponen dengan tingkat risiko yang lebih tinggi memerlukan frekuensi inspeksi yang lebih sering dan metode pemeriksaan yang lebih komprehensif dibandingkan komponen dengan risiko yang lebih rendah. Oleh karena itu, matriks risiko menjadi acuan dalam penyusunan strategi inspeksi berbasis risiko guna meningkatkan keandalan dan keselamatan operasi *Heat Recovery Boiler*. Tabel 5 menunjukkan hasil klasifikasi PoF dan CoF, sedangkan Gambar 3 memperlihatkan matriks risiko 5×5 yang digunakan dalam penelitian ini.

3.7. Usulan Strategi Pemeliharaan

Berdasarkan hasil analisis *Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA), *Fishbone Diagram*, dan *Risk-Based Inspection* (RBI), strategi pemeliharaan difokuskan pada komponen yang memiliki tingkat risiko kegagalan tertinggi. Pendekatan ini memungkinkan kegiatan inspeksi dan pemeliharaan dilakukan secara lebih terarah dengan memprioritaskan komponen yang berpotensi memberikan dampak terbesar terhadap keandalan *Heat Recovery Boiler*. Melalui penerapan RBI, prioritas inspeksi ditentukan berdasarkan tingkat risiko sehingga frekuensi dan metode inspeksi dapat disesuaikan dengan kondisi masing-masing komponen [24].

Hasil analisis menunjukkan bahwa *Water Wall Tubes* merupakan komponen dengan kategori risiko *Extreme*, sehingga memerlukan inspeksi yang lebih sering menggunakan metode *Visual Inspection*, *Ultrasonic Thickness Measurement* (UTM), serta metode *Non-Destructive Testing* (NDT) lainnya untuk mendeteksi penurunan ketebalan material, korosi, dan indikasi *tube leakage*. Sementara itu, *Superheater Tubes* dan *Economizer Tubes* yang berada pada kategori *High* memerlukan inspeksi berkala untuk memantau kondisi permukaan pipa dan efisiensi perpindahan panas. Adapun *Steam Drum*, *Riser Tubes*, dan *Downcomer* yang berada pada kategori *Medium* dapat diperiksa sesuai interval inspeksi yang telah ditetapkan berdasarkan tingkat risikonya.

Penerapan strategi pemeliharaan berbasis risiko diharapkan dapat meningkatkan efektivitas program inspeksi, mengoptimalkan penggunaan sumber daya pemeliharaan, serta mengurangi potensi terjadinya *unplanned shutdown*. Selain itu, pendekatan ini dapat membantu mempertahankan keandalan *Heat Recovery Boiler*, memperpanjang umur pakai komponen, dan menjaga kontinuitas operasi pembangkit listrik tenaga sampah secara berkelanjutan.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian mengenai analisis keandalan *Heat Recovery Boiler* pada Pembangkit Listrik Tenaga Sampah (PSEL) menggunakan metode *Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA) dan *Fishbone Diagram*, diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut.

1. Metode *Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA) dapat diterapkan untuk mengidentifikasi mode kegagalan yang berpotensi terjadi pada komponen *Heat Recovery Boiler* serta menentukan tingkat prioritas risiko berdasarkan nilai *Risk Priority Number* (RPN). Melalui pendekatan ini, setiap komponen dapat dievaluasi berdasarkan tingkat keparahan dampak (*Severity*), frekuensi terjadinya kegagalan (*Occurrence*), dan kemampuan pendeteksian (*Detection*), sehingga diperoleh dasar yang objektif dalam menentukan prioritas pemeliharaan.
2. Hasil analisis FMEA menunjukkan bahwa *water wall tube* merupakan komponen paling kritis pada *Heat Recovery Boiler* karena memiliki nilai RPN tertinggi dibandingkan komponen lainnya. Mode kegagalan utama yang teridentifikasi adalah *tube leakage* yang disebabkan oleh penurunan ketebalan dinding pipa akibat korosi, erosi, dan paparan temperatur tinggi selama operasi. Kegagalan pada komponen ini berpotensi mengganggu proses pembentukan uap, menurunkan efisiensi perpindahan panas, meningkatkan *downtime*, serta mengurangi keandalan sistem pembangkitan listrik secara keseluruhan.
3. Analisis menggunakan *Fishbone Diagram* menunjukkan bahwa kegagalan *tube leakage* pada *water wall tube* dipengaruhi oleh enam kelompok faktor, yaitu manusia (*man*), mesin (*machine*), metode (*method*), material (*material*), pengukuran (*measurement*), dan lingkungan (*environment*). Faktor-faktor tersebut saling berinteraksi

sehingga mempercepat proses degradasi komponen. Oleh karena itu, upaya pencegahan tidak dapat difokuskan hanya pada satu aspek, tetapi perlu dilakukan secara terpadu melalui peningkatan kualitas inspeksi, pengendalian kondisi operasi, perbaikan prosedur pemeliharaan, pemilihan material yang sesuai, serta pemantauan kondisi komponen secara berkala.

4. Berdasarkan Penerapan metode Risk-Based Inspection (RBI) berhasil mengelompokkan komponen Heat Recovery Boiler berdasarkan tingkat risikonya melalui kombinasi *Probability of Failure (PoF*) dan *Consequence of Failure* (CoF). Hasil klasifikasi menunjukkan bahwa *Water Wall Tubes* berada pada kategori *Extreme, Superheater Tubes* dan *Economizer Tubes* pada kategori *High,* sedangkan *Steam Drum, Riser Tubes*, dan *Downcomer* termasuk kategori Medium.
5. Integrasi metode FMEA, *Fishbone Diagram*, dan RBI menghasilkan strategi inspeksi dan pemeliharaan yang lebih terarah melalui penentuan prioritas komponen, metode inspeksi, dan interval pemeriksaan berdasarkan tingkat risiko. Pendekatan ini diharapkan dapat meningkatkan keandalan *Heat Recovery Boiler*, mengurangi potensi unplanned shutdown, serta mendukung keberlangsungan operasi Pembangkit Listrik Tenaga Sampah (PSEL).

5. Daftar Pustaka

[1] Tan, H., Wang, C., & Chen, G. (2020). *Waste-to-Energy Incineration Technologies and Heat Recovery Systems*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 119, 109589.
[2] Liu, Y., Zhang, X., & Li, J. (2020). Performance Analysis of Waste Heat Recovery Boiler in Municipal Solid Waste Incineration Power Plants. *Energy Reports*, 6, 1318–1327.
[3] Zhang, L., Wang, H., & Zhao, Y. (2021). High-Temperature Corrosion Characteristics of Boiler Tubes in Municipal Solid Waste Incineration Plants. *Engineering Failure Analysis*, 124, 105363.
[4] Stamatis, D. H. (2003). *Failure Mode and Effect Analysis: FMEA from Theory to Execution*. 2nd ed. Milwaukee: ASQ Quality Press.
[5] American Petroleum Institute. (2016). *API Recommended Practice 580: Risk-Based Inspection*. 3rd ed. Washington, DC: American Petroleum Institute.
[6] IEC. *IEC 60812: Failure Modes and Effects Analysis (FMEA and FMECA)*. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2018.
[7] ASM International. *ASM Handbook, Volume 11: Failure Analysis and Prevention*. Materials Park, OH: ASM International, 2002.
[8] Ishikawa, K. *Introduction to Quality Control*. Tokyo: 3A Corporation, 1990.
[9] American Petroleum Institute. *API Recommended Practice 581: Risk-Based Inspection Methodology*. 3rd ed. Washington, DC: American Petroleum Institute, 2016.
[10] Tan, H., Wang, C., & Chen, G. (2020). *Waste-to-Energy Incineration Technologies and Heat Recovery Systems*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 119, 109589.
[11] Liu, Y., Zhang, X., & Li, J. (2020). Performance Analysis of Waste Heat Recovery Boiler in Municipal Solid Waste Incineration Power Plants. *Energy Reports*, 6, 1318–1327.
[12] Babcock & Wilcox. (2018). *Steam: Its Generation and Use*. 42nd ed. Barberton, OH: Babcock & Wilcox.
[13] Zhang, L., Wang, H., & Zhao, Y. (2021). High-Temperature Corrosion Characteristics of Boiler Tubes in Municipal Solid Waste Incineration Plants. *Engineering Failure Analysis*, 124, 105363.
[14] ASM International. *ASM Handbook, Volume 11: Failure Analysis and Prevention*. Materials Park, OH: ASM International, 2002.
[15] Viswanathan, R. *Damage Mechanisms and Life Assessment of High-Temperature Components*. Materials Park, OH: ASM International, 2008.
[16] Stamatis, D. H. *Failure Mode and Effect Analysis: FMEA from Theory to Execution*. 2nd ed. Milwaukee: ASQ Quality Press, 2003..
[17] D. A. Tillman, *Steam Generation and Waste Heat Recovery Systems*. Tulsa, OK, USA: PennWell Corporation, 2013.
[18] T. A. Adams and P. I. Barton, "Reliability and Maintenance Optimization of Industrial Boiler Systems," *Applied Thermal Engineering*, vol. 115, pp. 1145–1156, 2017.
[19] API Recommended Practice 581, *Risk-Based Inspection Methodology*, 3rd ed. Washington, DC, USA: American Petroleum Institute, 2016.
[20] IEC 60812, Failure Modes and Effects Analysis (FMEA and FMECA), International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland, 2018.
[21] K. Ishikawa, Introduction to Quality Control. Tokyo, Japan: 3A Corporation, 1986
[22] ASM International, Failure Analysis and Prevention, ASM Handbook, vol. 11. Materials Park, OH, USA: ASM International, 2002.
[23] American Petroleum Institute. *API Recommended Practice 580: Risk-Based Inspection*. 3rd ed. Washington, DC: American Petroleum Institute, 2016.
[24] American Petroleum Institute. *API Recommended Practice 581: Risk-Based Inspection Methodology*. 3rd ed. Washington, DC: American Petroleum Institute, 2016.