

DAMPAK KEBOCORAN RISER WALL TUBE TERHADAP PRODUKSI ENERGI DAN KERUGIAN KWH PADA SISTEM PEMBANGKIT LISTRIK: STUDI KASUS PLTU XYZ UNIT 1

Muhammad Facheruddin BJ¹, Muhammad Ikram Kido¹, Muhammad Zainuddin¹, Abdul Halim¹, M. Anis Ilahi Rahmadhani¹, Padhlani Qurrata A'yun¹, Mujahid Ikhlusal Amal¹, Ismail¹, A. Besse Riyani Indah²

¹ Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Ujung Pandang

Jl. Perintis Kemerdekaan KM. 10, Tamalanrea, Kota Makassar, Sulawesi Selatan

² Departemen Teknik Industri, Universitas Hasanuddin

Jl. Poros Malino Km. 6, Bontomarannu, Kabupaten Gowa, Sulawesi Selatan 92171

m.facheruddinbj@poliupg.ac.id¹

Abstrak

Kebocoran pada *riser wall tube* merupakan salah satu permasalahan utama pada boiler pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) karena berperan vital dalam proses pembentukan uap sehingga kegagalannya berdampak langsung pada kinerja termodinamika dan kontinuitas operasi pembangkit. Tujuan penelitian ini adalah untuk menganalisis dampak kebocoran riser wall tube terhadap performa termodinamika dan kerugian energi pada PLTU XYZ Unit 1. Penelitian ini menganalisis kasus kebocoran *riser wall tube* dengan membandingkan kondisi operasional sebelum dan sesudah kejadian. Data menunjukkan penurunan beban dari 49,3 MW menjadi 40 MW, penurunan tekanan uap utama dari 8,6 MPa menjadi 8,13 MPa, serta penurunan temperatur uap dari 536 °C menjadi 530°C. Selain itu, tekanan *furnace* meningkat signifikan dari -214 Pa menjadi 2.500 Pa, sedangkan tekanan *windbox* naik dari 12,3 kPa menjadi 17,5 kPa. Kondisi ini diikuti penurunan efisiensi boiler dari 88% menjadi 80% dan peningkatan konsumsi bahan bakar. Hasil perhitungan menunjukkan total kerugian energi sebesar 5.968.095 kWh dengan nilai kerugian finansial mencapai Rp. 4.243.613.949, menegaskan bahwa kebocoran *riser wall tube* tidak hanya menurunkan performa teknis pembangkit, tetapi juga menimbulkan kerugian ekonomi yang signifikan. Penelitian ini menyimpulkan bahwa penerapan strategi *predictive maintenance*, inspeksi rutin dengan metode *non-destructive test* (NDT), serta monitoring *real-time* parameter operasi menjadi langkah penting untuk meningkatkan keandalan, memperpanjang umur komponen kritis, dan meminimalkan risiko kerugian akibat kebocoran serupa di masa mendatang.

Kata kunci : *riser wall tube*, kebocoran, PLTU, efisiensi energi, kerugian kWh.

Abstract

Leakage in the riser wall tube is one of the main problems in the boiler of a steam power plant (PLTU) because it plays a vital role in the steam formation process so that its failure directly impacts the thermodynamic performance and continuity of plant operation. The purpose of this study is to analyze the impact of leaking riser wall tubes on thermodynamic performance and energy losses in PLTU XYZ Unit 1. This study analyzes the case of the leaking riser wall tube by comparing operational conditions before and after the incident. The data shows a decrease in load from 49.3 MW to 40 MW, a decrease in main steam pressure from 8.6 MPa to 8.13 MPa, and a decrease in steam temperature from 536°C to 530°C. In addition, the furnace pressure increased significantly from -214 Pa to 2,500 Pa, while the windbox pressure increased from 12.3 kPa to 17.5 kPa. This condition is followed by a decrease in boiler efficiency from 88% to 80% and an increase in fuel consumption. The calculation results show a total energy loss of 5,968,095 kWh with a financial loss value of Rp 4,243,613,949, confirming that the riser wall tube leak not only reduces the technical performance of the plant but also causes significant economic losses. This study concludes that the implementation of predictive maintenance strategies, routine inspections using non-destructive testing (NDT) methods, and real-time monitoring of operating parameters are important steps to improve reliability, extend the life of critical components, and minimize the risk of losses due to similar leaks in the future.

Key words : *riser wall tube*, leak, PLTU, energy efficiency, kWh loss.

PENDAHULUAN

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) masih menjadi salah satu penyedia utama energi listrik di Indonesia. Hal ini didorong oleh ketersediaan batubara yang melimpah, harga bahan bakar yang relatif lebih rendah dibanding energi primer lain, serta kemampuan PLTU menghasilkan daya dalam skala besar secara kontinu [1]. Akan tetapi, tingginya ketergantungan terhadap PLTU juga menjadikan isu keandalan dan efisiensi sebagai faktor yang sangat krusial [2]. Gangguan sekecil apa pun pada sistem boiler dapat menyebabkan penurunan produksi listrik dalam jumlah besar dan berdampak pada kestabilan pasokan energi nasional [3].

Boiler sebagai jantung PLTU bekerja berdasarkan prinsip siklus Rankine, di mana air dipanaskan hingga menjadi uap bertekanan tinggi untuk menggerakkan turbin [4]. Keandalan boiler sangat dipengaruhi oleh integritas komponen utamanya, salah satunya adalah *riser wall tube* [5]. *Riser wall tube* berfungsi menyalurkan air sirkulasi ke *furnace* untuk dipanaskan menjadi uap sehingga komponen ini selalu terpapar temperatur tinggi [6], tekanan internal tinggi, serta gas hasil pembakaran yang mengandung partikel abrasif dan zat korosif [7], [8]. Kondisi ekstrem ini membuat *riser wall tube* menjadi salah satu titik paling rentan terhadap kegagalan [9].

Berbagai penelitian menunjukkan bahwa kebocoran pada *riser wall tube* merupakan salah satu penyebab utama terjadinya *forced outage* pada PLTU di berbagai negara [10]. Kegagalan tersebut umumnya disebabkan oleh mekanisme korosi dan erosi pada dinding pipa, yang dilaporkan menyumbang lebih dari 60% dari total kasus kerusakan pada sistem boiler [11], [12]. Setiap kejadian kebocoran pipa tidak hanya menurunkan performa teknis pembangkit, tetapi juga menimbulkan kerugian ekonomi yang signifikan akibat hilangnya produksi listrik, bahkan dapat mencapai jutaan dolar untuk satu kejadian [13]. Di Indonesia, gangguan serupa pada sistem boiler juga berdampak besar terhadap kinerja pembangkit, dengan potensi kehilangan produksi hingga jutaan kWh dan kerugian finansial mencapai miliaran rupiah tergantung pada kapasitas unit [3].

Selain faktor teknis, aspek ekonomi dari kebocoran juga sangat penting untuk diperhatikan. Kerugian energi yang besar berdampak pada kerugian finansial yang signifikan, terutama bagi pembangkit berbasis skema jual beli listrik [14]. Analisis kerugian energi akibat kerusakan komponen boiler penting untuk menyusun strategi

pemeliharaan yang lebih efektif [15]. *Predictive maintenance* berbasis data, penggunaan material yang lebih tahan terhadap korosi, dan inspeksi berkala dengan metode *non-destructive test* (NDT) menjadi pendekatan yang banyak direkomendasikan [16][17].

Kasus kebocoran *riser wall tube* di PLTU XYZ Unit 1 pada 12 Juni 2024 menjadi bukti nyata betapa serius dampak kegagalan komponen ini. Perubahan signifikan terjadi pada parameter operasional, termasuk penurunan beban, penurunan tekanan dan temperatur uap, kenaikan tekanan *furnace* dan *windbox*, serta turunnya efisiensi boiler. Tidak hanya itu, kerugian energi tercatat mencapai jutaan kWh dengan dampak finansial yang sangat besar.

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dampak kebocoran *riser wall tube* terhadap produksi energi dan kerugian kWh di PLTU XYZ Unit 1. Hasil analisis ini diharapkan tidak hanya memberikan pemahaman lebih mendalam terkait kasus yang terjadi, tetapi juga dapat menjadi dasar untuk pengembangan strategi pemeliharaan yang lebih efektif dalam meningkatkan keandalan dan efisiensi PLTU di masa depan [18].

METODE PENELITIAN

Metode penelitian menggunakan pendekatan studi kasus dengan menganalisis data operasional unit sebelum terjadinya kebocoran diperoleh dari *historical trend* (*histrend*) parameter operasi pada sistem *Distributed Control System* (DCS) boiler. Data tersebut mencakup seluruh variabel proses yang terekam dan diarsipkan secara otomatis selama periode operasi normal sebelum dan sesudah insiden kebocoran terjadi. Selain itu, informasi pendukung juga dikumpulkan dari *logsheet* harian operator untuk memverifikasi konsistensi dan validitas data hasil perekaman sistem beserta data pendukung lainnya seperti laporan Root Cause Failure Analysis (RCFA) PLTU XYZ Unit 1. Data yang dianalisis meliputi:

- Beban operasional unit (MW),
- Tekanan dan temperatur steam utama,
- Aliran feed water,
- Tekanan *furnace* dan *windbox*,
- Efisiensi boiler,
- Produksi energi dan konsumsi bahan bakar,
- Estimasi kerugian energi dan finansial.

Langkah analisis meliputi:

1. Membandingkan parameter operasional sebelum dan sesudah kebocoran.

2. Menghitung kerugian energi (kWh) berdasarkan durasi gangguan.
3. Menghitung kerugian finansial menggunakan perbedaan harga jual listrik dan biaya operasional.
4. Menganalisis penurunan efisiensi dan peningkatan konsumsi bahan bakar.
5. Menyusun rekomendasi berbasis hasil analisis.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Data yang diperoleh dari laporan operasi PLTU XYZ Unit 1 sebelum dan sesudah kebocoran *riser wall tube* menunjukkan adanya perubahan signifikan pada beberapa parameter utama. Pada kondisi normal, unit mampu beroperasi dengan beban sekitar 49,3 MW dengan tekanan uap utama sebesar 8,6 MPa dan temperatur uap mencapai 536 °C. Namun, setelah kebocoran terjadi, beban turun menjadi 40 MW, tekanan uap turun menjadi 8,13 MPa, dan temperatur uap turun menjadi 530 °C. Penurunan ini menunjukkan bahwa kebocoran berdampak langsung pada kestabilan suplai uap ke turbin.

Tabel 1 Data Operasional Boiler

Parameter	Sebelum Kebocoran	Setelah Kebocoran
Beban Operasional (MW)	49,3	40
Tekanan Steam Utama (MPa)	8,6	8,13
Temperatur Steam (°C)	536	530
Aliran Feed Water (t/h)	212	209
Tekanan Furnace (Pa)	-214	2.500
Tekanan Windbox (kPa)	12,3	17,5
Efisiensi Boiler (%)	88	80
Konsumsi Bahan Bakar	100	105

Selain itu, aliran *feed water* mengalami sedikit penurunan dari 212 t/h menjadi 209 t/h, sedangkan tekanan *furnace* justru meningkat drastis dari kondisi normal -214 Pa menjadi 2.500 Pa. Hal ini menandakan adanya gangguan pada sirkulasi gas pembakaran di dalam *furnace*. Peningkatan serupa juga terjadi pada tekanan *windbox*, dari 12,3 kPa menjadi 17,5 kPa, yang menunjukkan bertambahnya resistansi aliran udara pembakaran akibat kebocoran.



Gambar 1 Kondisi kebocoran pada *riser wall tube*

Selain data operasional yang tercatat, bukti visual juga memperlihatkan kondisi nyata terjadinya kebocoran pada *riser wall tube*. Pada gambar hasil inspeksi lapangan terlihat jelas semburan fluida bertekanan keluar melalui celah kecil pada permukaan pipa. Fenomena ini menegaskan adanya penipisan dinding pipa akibat erosi dan korosi sehingga material tidak lagi mampu menahan tekanan internal.

Kebocoran ini menyebabkan unit berhenti beroperasi untuk mencegah kerusakan lebih lanjut serta menjaga keselamatan sistem. Kondisi ini juga menjelaskan mengapa tekanan *furnace* dan *windbox* mengalami kenaikan signifikan sebagaimana tercatat dalam data operasional.

Dengan adanya bukti visual ini, data numerik yang tercatat pada sistem operasi makin diperkuat bahwa kebocoran *riser wall tube* memang menjadi penyebab utama penurunan performa dan terjadinya kerugian energi maupun finansial pada PLTU XYZ Unit 1.

1. Perhitungan Kerugian Energi

Perhitungan kerugian energi dilakukan dengan mengalikan rata-rata produksi energi per jam pada kondisi normal dengan total durasi gangguan akibat kebocoran dengan menggunakan persamaan berikut ini:

$$E_{loss} = P_{normal} \times t_{gangguan} \dots\dots\dots (1)$$

Keterangan:

E_{loss} = energi yang hilang akibat gangguan (kWh)

P_{normal} = daya keluaran normal unit pembangkit sebelum terjadi gangguan (kW atau MW)

$t_{gangguan}$ = durasi waktu gangguan atau penurunan beban akibat kebocoran (jam)

Persamaan ini digunakan untuk menghitung total energi listrik yang tidak dapat diproduksi selama periode gangguan. Nilai E_{loss} menggambarkan besarnya kehilangan produksi energi akibat berhentinya atau menurunnya kinerja unit pembangkit.

Diketahui:

$$P_{normal} = 45.270 \text{ kWh/jam}$$

$$t_{gangguan} = 131,83 \text{ jam}$$

Ditanyakan:

$$E_{loss} = ?$$

Penyelesaian:

$$E_{loss} = P_{normal} \times t_{gangguan}$$

$$E_{loss} = 45.270 \times 131,83$$

$$E_{loss} = 5.968.095 \text{ kWh}$$

Nilai kehilangan energi sebesar 5.968.095 kWh menggambarkan total energi listrik yang seharusnya dapat diproduksi oleh unit pembangkit selama periode gangguan. Untuk memberikan gambaran skala dampaknya, nilai tersebut dapat dibandingkan dengan kebutuhan listrik rumah tangga.

Tabel 2 Listrik Yang Didistribusikan Kepada Pelanggan (GWh) Tahun 2023

Kelompok Pelanggan - PLN	Tahun 2023
Sosial	11.496,09
Rumah Tangga	122.339,71
Bisnis	57.112,02
Industri	88.587,71
Publik	8.900,31
Semua Pelanggan	288.435,84

Menurut Data Badan Pusat Statistik, PLN, dan Kementerian ESDM (2023), rata-rata konsumsi listrik rumah tangga di Indonesia berada pada kisaran 1.200–1.500 kWh per rumah tangga per tahun, atau sekitar 100–125 kWh per bulan, yang ekuivalen dengan 3,3–4,2 kWh per hari. Dengan demikian, dalam satu jam, konsumsi listrik rata-rata sebuah rumah tangga sekitar:

$$\text{Konsumsi per jam} = \frac{4,0 \text{ kWh}}{24} = 0,17 \text{ kWh/jam}$$

Jika total energi yang hilang sebesar 5.968.095 kWh dibandingkan dengan konsumsi rata-rata per rumah tangga per jam tersebut, maka:

$$\begin{aligned} \text{Jumlah rumah tangga ekuivalen} &= \frac{5.968.095}{0,17} \\ &= 35.100.000 \text{ rumah tangga-jam} \end{aligned}$$

Artinya, energi yang hilang akibat kebocoran setara dengan kebutuhan listrik lebih dari 200 ribu rumah tangga selama sekitar 175 jam (sekitar satu minggu operasi normal).

2. Perhitungan Kerugian Finansial

Kerugian finansial dihitung berdasarkan biaya operasional per kWh dan harga jual energi. Nilai perbedaan harga per kWh dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$L_{finansial} = (H_{jual} - C_{operasi}) \times E_{loss}$$

Keterangan:

$L_{finansial}$ = kerugian ekonomi akibat kehilangan produksi listrik (Rp)

H_{jual} = harga jual listrik ke jaringan (*feed-in tariff*) (Rp/kWh)

$C_{operasi}$ = biaya operasional rata-rata pembangkit per satuan energi (Rp/kWh)

E_{loss} = energi yang hilang akibat gangguan (kWh)

Persamaan ini menghitung besarnya kerugian finansial bersih yang ditimbulkan oleh gangguan operasi, dengan mempertimbangkan selisih antara potensi pendapatan dari penjualan listrik dan biaya operasional yang seharusnya dikeluarkan untuk menghasilkan energi tersebut.

Diketahui:

$$H_{jual} = \text{Rp } 1.445/\text{kWh}$$

$$C_{operasi} = 733,95/\text{kWh}$$

$$E_{loss} = 5.968.095 \text{ kWh}$$

Ditanyakan:

$$L_{finansial} = ?$$

Penyelesaian:

$$L_{finansial} = (H_{jual} - C_{operasi}) \times E_{loss}$$

$$L_{finansial} = (1.445 - 733,95) \times 5.968.095$$

$$L_{finansial} = 711,05 \times 5.968.095$$

$$L_{finansial} = \text{Rp } 4.243.613.949$$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa kebocoran pada *riser wall tube* tidak hanya

menurunkan kinerja teknis pembangkit, tetapi juga memberikan dampak ekonomi yang signifikan. Berdasarkan data operasi, kondisi normal unit menghasilkan daya rata-rata sebesar 45.270 kWh per jam, sedangkan selama periode gangguan terjadi kehilangan produksi energi total sebesar 5.968.095 kWh. Jika nilai tersebut dikonversi ke aspek finansial, maka diperoleh estimasi kerugian mencapai Rp 4.243.613.949 untuk satu kali kejadian. Tabel 3 menyajikan ringkasan hasil perhitungan produksi energi dan kerugian akibat kebocoran.

Tabel 3 Produksi Energi dan Kerugian

Parameter	Nilai	Satuan
Produksi Energi Normal	45.270	kWh/jam
Total Kerugian Energi	5.968.095	kWh
Kerugian Finansial	4.243.613.949	IDR

Kerugian energi sebesar hampir enam juta kWh tersebut menunjukkan besarnya dampak operasional yang ditimbulkan oleh kebocoran pada *Riser Wall Tube*. Nilai tersebut setara dengan kehilangan potensi pasokan listrik untuk lebih dari 200 ribu rumah tangga per jam operasi sebagaimana diuraikan pada bagian sebelumnya. Fakta ini menegaskan pentingnya penerapan strategi pemeliharaan prediktif, inspeksi periodik menggunakan metode *non-destructive test* (NDT), serta penerapan sistem monitoring *real-time* guna mendeteksi indikasi anomali tekanan dan temperatur lebih dini. Upaya ini diharapkan dapat meminimalkan risiko *forced outage*, meningkatkan keandalan sistem, serta menekan potensi kerugian ekonomi di masa mendatang.

Hasil perhitungan ini memperlihatkan bahwa kebocoran riser wall tube tidak hanya menurunkan kinerja teknis pembangkit, tetapi juga berdampak signifikan pada sisi ekonomi. Kerugian miliaran rupiah dalam satu kali kejadian menegaskan pentingnya strategi pemeliharaan prediktif dan sistem monitoring yang lebih baik untuk mencegah terulangnya masalah serupa di masa depan.

Hasil penelitian ini sejalan dengan temuan Ghosh et al. [5] yang melaporkan bahwa kebocoran pada *water wall tube* umumnya disebabkan oleh kombinasi korosi dan erosi pada sisi *furnace*, yang menyebabkan penurunan efisiensi termal boiler hingga 10%. Kondisi serupa juga ditemukan oleh Xue et al. [9], di mana kebocoran pada *water-wall tubes* menyebabkan peningkatan tekanan *furnace* dan tidak seimbangan sirkulasi gas pembakaran, pola yang identik dengan hasil pengamatan di PLTU XYZ Unit 1.

Selain itu, studi oleh Sethi dan Vikash [10] menunjukkan bahwa kegagalan dinding pipa pada boiler tipe *Benson once-through* menyebabkan penurunan tekanan uap utama sebesar 5–8% dan peningkatan konsumsi bahan bakar yang signifikan, hasil yang konsisten dengan penurunan efisiensi dari 88% menjadi 80% pada penelitian ini. Temuan Nurbanasari et al. [13] juga memperkuat bahwa kebocoran pipa boiler tidak hanya berdampak pada kinerja teknis, tetapi menimbulkan kerugian ekonomi besar akibat *forced outage* yang memerlukan waktu perbaikan panjang.

Dengan demikian, hasil studi kasus PLTU XYZ Unit 1 memperkuat kajian sebelumnya bahwa kebocoran pipa riser merupakan salah satu penyebab utama penurunan efisiensi sistem dan peningkatan biaya operasi pada PLTU, serta menegaskan pentingnya implementasi *predictive maintenance* dan inspeksi NDT secara berkala untuk menjaga keandalan pembangkit.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis yang dilakukan, dapat disimpulkan bahwa kebocoran *riser wall tube* pada PLTU XYZ Unit 1 memberikan dampak multidimensional yang sangat serius, baik terhadap aspek teknis, efisiensi energi, maupun ekonomi operasional pembangkit.

Secara operasional, kebocoran ini menyebabkan penurunan beban unit secara drastis dari 49,3 MW menjadi 40 MW, disertai turunnya tekanan dan temperatur uap utama. Perubahan ini menandakan terganggunya kestabilan sirkulasi fluida kerja dan penurunan kemampuan sistem dalam mentransfer energi panas secara optimal ke turbin sehingga menurunkan reliabilitas sistem pembangkitan secara keseluruhan.

Dampak lanjutan terdeteksi pada parameter *furnace* dan *windbox*, di mana tekanan mengalami peningkatan signifikan dibandingkan kondisi normal. Fenomena tersebut mengindikasikan ketidakseimbangan aliran udara dan gas pembakaran, yang berakibat pada pembakaran tidak sempurna dan menurunnya efisiensi termal boiler dari 88% menjadi 80%. Akibatnya, konsumsi bahan bakar meningkat, menandakan terjadinya penurunan efektivitas proses konversi energi dari panas menjadi listrik.

Dari sisi produksi energi, tercatat kerugian energi sebesar 5.968.095 kWh selama periode gangguan, dengan estimasi kerugian finansial mencapai Rp 4.243.613.949. Nilai ini menunjukkan bahwa kebocoran *riser wall tube* tidak hanya menjadi masalah teknis internal, tetapi juga

menimbulkan kerugian ekonomi makro bagi sistem kelistrikan yang bergantung pada unit tersebut.

Dengan demikian, integritas *riser wall tube* terbukti menjadi komponen krusial dalam menjaga stabilitas termohidrolik, efisiensi sistem, dan keberlanjutan operasi pembangkit. Upaya pencegahan melalui pemeliharaan prediktif berbasis data, inspeksi nondestruktif berkala, serta sistem monitoring *real-time* wajib diterapkan secara konsisten untuk meminimalkan potensi kegagalan serupa dan menjaga kinerja optimal PLTU di masa mendatang.

REKOMENDASI

1. Monitoring *real-time* parameter operasi

Disarankan agar PLTU XYZ Unit 1 menerapkan sistem monitoring *real-time* pada parameter kritis seperti tekanan *furnace*, tekanan *windbox*, aliran *feed water*, serta temperatur dan tekanan uap utama. Dengan adanya sensor dan sistem pengawasan yang terintegrasi, anomali kecil dapat terdeteksi lebih dini sehingga potensi kebocoran atau gangguan serius bisa dicegah sebelum berdampak pada kinerja pembangkit.

2. Inspeksi rutin dengan *Non-Destructive Test* (NDT)

Pemeriksaan berkala dengan metode NDT, seperti *ultrasonic thickness test* atau *radiographic test*, penting untuk mengevaluasi kondisi material *riser wall tube* tanpa harus menghentikan operasi dalam waktu lama. Dengan metode ini, penipisan pipa akibat erosi atau korosi dapat diketahui lebih cepat sehingga tindakan perbaikan atau penggantian bisa dilakukan sebelum kebocoran terjadi.

3. Penggantian material dengan ketahanan lebih baik terhadap erosi/korosi

Riser wall tube yang bekerja pada kondisi temperatur tinggi dan terpapar aliran gas pembakaran sering mengalami kerusakan akibat abrasi maupun korosi. Oleh karena itu, penggunaan material dengan ketahanan lebih tinggi, misalnya baja paduan khusus yang tahan panas dan abrasi, perlu dipertimbangkan. Langkah ini akan memperpanjang umur pakai pipa dan mengurangi risiko kebocoran berulang.

4. Penerapan *predictive maintenance* berbasis data

Selain pemeliharaan rutin, *predictive maintenance* berbasis analisis data operasi sangat diperlukan. Dengan memanfaatkan data historis dan algoritma analitik, operator dapat memprediksi tren

kerusakan pada komponen boiler. Hal ini memungkinkan tindakan pemeliharaan dilakukan lebih tepat waktu sehingga risiko *downtime* akibat kebocoran dapat ditekan seminimal mungkin.

5. Penyusunan rencana kontinjensi untuk mengurangi *downtime*

Kebocoran *riser wall tube* berpotensi menghentikan operasi unit secara tiba-tiba. Oleh karena itu, penting untuk menyusun rencana kontinjensi, seperti prosedur pelepasan beban secara bertahap, kesiapan peralatan cadangan hingga strategi perbaikan darurat. Dengan adanya rencana ini, waktu henti operasi dapat diminimalkan dan dampak kerugian finansial dapat ditekan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. K. Sethi and O. Vikash, "Failure analysis of the water-wall tube in once through Benson boiler," *Mater Today Proc*, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.12.143>.
- [2] C. Bhattacharya, B. Saha, J. Manna, and S. Bera, *Impact of Boiler Tube Failure in Power Pricing & Profitability*. 2007.
- [3] C. deni Mulyadi, T. Kristyadi, A. Putra, and D. Rusirawan, "Analisa Prestasi Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Berbahan Bakar BatuBara Hasil Upgrading," *Infotekmesin*, vol. 12, pp. 81–87, Mar. 2021, doi: 10.35970/infotekmesin.v12i1.370.
- [4] D. Ghosh, H. Roy, A. Saha, and C. Subramanian, "Failure Analysis of Boiler Water Wall Tube: A Case Study from Thermal Power Plant," *Journal of Failure Analysis and Prevention*, vol. 22, Jan. 2022, doi: 10.1007/s11668-021-01271-y.
- [5] D. S and J. A. V. V, "Analysis of corrosive degradation and failure of water wall tubes," *Mater Today Proc*, vol. 62, pp. 2168–2172, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.359>.
- [6] G. Prokhorskii, S. Rudra, M. Preissinger, and E. Eder, "A data-driven regression model for predicting thermal plant performance under load fluctuations," *Carbon Neutrality*, vol. 3, Oct. 2024, doi: 10.1007/s43979-024-00108-5.

- [7] J. H. Bulloch, A. G. Callagy, S. Scully, and A. Greene, "A failure analysis and remnant life assessment of boiler evaporator tubes in two 250MW boilers," *Eng Fail Anal*, vol. 16, no. 3, pp. 775–793, 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2008.06.020>.
- [8] L. Pang, S. Yi, L. Duan, W. Li, and Y. Yang, "Thermal Stress and Cyclic Stress Analysis of a Vertical Water-Cooled Wall at a Utility Boiler under Flexible Operation," *Energies (Basel)*, vol. 12, p. 1170, Mar. 2019, doi: 10.3390/en12061170.
- [9] M. Dharmakusuma, B. Belyamin, and W. Widiyatmoko, "Analisis Eksergi Pada Boiler PLTU," *Jurnal Mekanik Terapan*, vol. 1, pp. 45–53, Oct. 2020, doi: 10.32722/jmt.v1i1.3331.
- [10] M. Gabonewe, M. Munsamy, and A. Telukdarie, *Evaluating the effectiveness of a boiler plant's predictive maintenance system*. 2021. doi: 10.1109/TEMSCON-EUR52034.2021.9488631.
- [11] M. Nurbanasari *et al.*, "Metallurgical analysis of a water wall tube leakage in a 600-MW coal-fired power plant," *Eng Fail Anal*, vol. 182, p. 110004, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2025.110004>.
- [12] P. S. Sanjay and D. R. K. Mandloi, "A Failure Analysis and Remaining Life assessment of Boiler Water Wall tube," *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*, vol. 3, no. 7, 2016.
- [13] P. Tadge, S. Kumar, S. Kumar De, and S. Kumar Mohanty, "Metallurgical investigation of boiler tube failure in a power plant," *Mater Today Proc*, vol. 66, pp. 3799–3803, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.06.164>.
- [14] R. K. Hosseini and Sh. Yareiee, "Failure analysis of boiler tube at a petrochemical plant," *Eng Fail Anal*, vol. 106, p. 104146, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.104146>.
- [15] S. Noori and J. Price, "A risk approach to the management of boiler tube thinning," *Nuclear Engineering and Design*, vol. 236, pp. 405–414, Feb. 2006, doi: 10.1016/j.nucengdes.2005.09.019.
- [16] S. Xue *et al.*, "Analysis of the causes of leakages and preventive strategies of boiler water-wall tubes in a thermal power plant," *Eng Fail Anal*, vol. 110, p. 104381, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104381>.
- [17] X. Sun, Y. Ning, J. Yang, Y. Zhao, Z. Yang, and X. Zhou, "Study on high temperature corrosion mechanism of water wall tubes of 350 MW supercritical unit," *Eng Fail Anal*, vol. 121, p. 105131, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.105131>.
- [18] Z. Yan, L. Wang, X. Li, J. Wei, C. Liu, and Y. Da, "Failure mechanism of superheater tubes of waste heat boiler for waste incineration in complex environment," *Eng Fail Anal*, vol. 139, p. 106457, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106457>.