Seminar Nasional Teknik Industri [SNTI] 2026
Lhokseumawe-Aceh, 20-21 Oktober 2026
ISSN 2338-7122

ANALISIS PENYEBAB KEBOCORAN PIPA HT *WATER COOLING ENGINE* WÄRTSILÄ 18V50SG DENGAN *ROOT CAUSE ANALYSIS* (RCA)

Sindi Maulianda[1], A.Amri[2*]

[1]Program Studi Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas Malikussaleh
*Email: sindi.230130001@mhs.unimal.ac.id, iramri@unimal.ac.id

Abstrak

Keandalan sistem pendinginan diperlukan untuk menjaga kontinuitas operasi *engine* pembangkit. Pada PT X ditemukan rembesan pada sambungan *flange*, penurunan elastisitas O-*ring*, dan kebocoran aktif pada pipa HT *Water Cooling jacket outlet engine* Wärtsilä 18V50SG. Gangguan tersebut berpotensi mengurangi efektivitas pendinginan dan menimbulkan risiko gangguan operasi, sedangkan penggantian komponen *sealing* dan *flushing* sistem belum memiliki jadwal preventif yang terstruktur. Penelitian ini bertujuan mengidentifikasi faktor penyebab dan akar masalah kebocoran serta merumuskan prioritas perbaikan. Metode yang digunakan adalah *Root Cause Analysis* (RCA) melalui pengelompokan *Fishbone Diagram* dan penelusuran 5 *Whys*. Data diperoleh dari observasi, wawancara pemeliharaan, serta catatan operasional dan gangguan Desember 2025–Januari 2026. Hasil menunjukkan enam kelompok faktor penyebab, yaitu *Man, Machine, Method, Material, Measurement*, dan *Environment*. Faktor *Method* menjadi fokus utama karena belum tersedia standar interval penggantian gasket/O-ring berbasis jam operasi dan SOP *flushing* berkala. Rekomendasi diprioritaskan secara kualitatif berdasarkan keterkaitan langsung dengan akar penyebab, kemampuan mencegah gangguan berulang, dan urutan kebutuhan pelaksanaan; tindakan awal mencakup penyusunan interval penggantian sealing dan SOP *flushing*.

Kata kunci: Kebocoran Pipa, HT *Water Cooling*, *Root Cause Analysis*, *Fishbone Diagram*, 5 *Whys*

1. Pendahuluan

Engine Wärtsilä 18V50SG merupakan mesin pembangkit yang bekerja pada beban dan temperatur operasi tinggi. Selama proses pembakaran, panas yang dihasilkan harus dikendalikan agar komponen *engine* tetap berada pada kondisi operasi yang aman. *Cooling system* berfungsi menyerap dan membuang panas berlebih sehingga temperatur kerja *engine* dapat dipertahankan pada batas yang diizinkan [1]. Pada *engine* pembangkit, sistem pendinginan menggunakan *High Temperature* (HT) *Water* dan *Low Temperature* (LT) *Water*. HT *Water* berperan mendinginkan bagian utama *engine*, termasuk *cylinder liner* dan *cooling jacket*, melalui sirkulasi air pendingin [2].

Salah satu komponen penting dalam sistem tersebut adalah pipa HT *Water Cooling jacket Outlet*. Setelah menyerap panas dari *cooling jacket*, air pendingin dialirkan melalui pipa *outlet* menuju sistem pendingin berikutnya sebelum disirkulasikan kembali. Kondisi pipa dan sambungannya menjadi penting karena komponen bekerja pada temperatur dan tekanan yang relatif tinggi. Data operasional yang diperoleh pada objek penelitian menunjukkan temperatur HT *Water* berada pada kisaran 82–86 °C dengan tekanan sekitar 3,9 bar, sedangkan jam operasi *engine* telah mencapai lebih dari 26.000 jam. Kondisi tersebut dapat meningkatkan paparan termal dan mekanis terhadap pipa serta komponen *sealing* [2][3].

Berdasarkan observasi di PT. X, ditemukan gangguan berupa rembesan hingga kebocoran aktif pada pipa HT *Water Cooling jacket* Outlet. Kebocoran pada sistem HT *Water* dapat mengurangi efektivitas pendinginan, mengganggu kestabilan temperatur *engine*, dan meningkatkan risiko *overheating* apabila tidak segera ditangani [4]. Data historis Desember 2025–Januari 2026 juga menunjukkan adanya rembesan pada *flange*, penurunan elastisitas oring, serta kejadian kebocoran aktif saat *engine* beroperasi pada beban tinggi. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa gangguan tidak hanya berkaitan dengan kondisi fisik pipa, tetapi juga dapat dipengaruhi oleh pemeliharaan, metode kerja, material, pengukuran, dan kondisi operasi.

ISSN 2338-7122

Root Cause Analysis (RCA) digunakan karena pendekatan ini menelusuri hubungan sebab-akibat untuk menemukan penyebab dasar, bukan hanya menangani gejala yang muncul [5][6]. *Fishbone Diagram* membantu mengelompokkan faktor penyebab secara sistematis, sedangkan 5 *Whys Analysis* digunakan untuk menggali penyebab secara bertahap sampai ditemukan akar masalah [7], [9]. Dengan demikian, kombinasi RCA, *Fishbone Diagram*, dan 5 *Whys* sesuai digunakan untuk menganalisis kebocoran pada pipa HT *Water Cooling jacket Outlet* dan merumuskan tindakan pencegahan yang lebih tepat.

Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi akar penyebab kebocoran pada pipa HT *Water Cooling jacket Outlet engine* Wärtsilä 18V50SG, menganalisis faktor penyebab berdasarkan kategori *Fishbone Diagram*, serta menentukan faktor dominan dan usulan perbaikan berdasarkan hasil RCA dan 5 *Whys Analysis*.

2. Landasan Teori

2.1 Sistem HT *Water Cooling*

Sistem HT *Water Cooling* merupakan bagian dari sistem pendinginan *engine* yang berfungsi menjaga temperatur komponen utama agar tetap berada pada kondisi operasi yang sesuai. *Cooling jacket* mengelilingi bagian *cylinder liner* dan *cylinder head* sehingga air pendingin dapat menyerap panas hasil pembakaran secara langsung. Setelah menyerap panas, air mengalir keluar melalui pipa HT *Water Cooling jacket Outlet* untuk diteruskan ke sistem pendinginan berikutnya [2][3].

Kebocoran pada sistem HT *Water* dapat terjadi pada pipa, sambungan *flange*, gasket, oring, maupun *body* pipa. Kebocoran dapat berbentuk rembesan ringan sampai kebocoran aktif yang menyebabkan berkurangnya volume air pendingin dan berpotensi menurunkan efektivitas pendinginan [4]. Faktor yang dapat memperbesar risiko kebocoran meliputi temperatur tinggi, tekanan internal, getaran *engine*, korosi, penurunan elastisitas *sealing*, serta pemeliharaan yang belum optimal [3][4].

2.2 *Root Cause Analysis* (RCA)

Root Cause Analysis adalah pendekatan sistematis untuk menemukan penyebab mendasar dari suatu permasalahan sehingga tindakan perbaikan tidak berhenti pada penanganan gejala. RCA menekankan pengumpulan informasi, pemetaan faktor penyebab, identifikasi akar penyebab, serta penyusunan rekomendasi perbaikan [5][6]. Dalam konteks pemeliharaan, RCA dapat digunakan untuk menghubungkan kondisi komponen, proses pemeliharaan, dan kondisi operasi dengan kejadian kegagalan yang ditemukan di lapangan [11][12][13].

2.3 *Fishbone Diagram*

Fishbone Diagram atau diagram sebab-akibat merupakan alat untuk mengelompokkan berbagai kemungkinan penyebab suatu masalah ke dalam kategori tertentu sehingga hubungan sebab dan akibat lebih mudah dipetakan [10]. Pada penelitian ini kategori yang digunakan adalah *Man, Machine, Method, Material, Measurement*, dan *Environment*. Pengelompokan tersebut membantu mengarahkan analisis dari kondisi fisik komponen menuju faktor proses dan pengendalian yang memengaruhi terjadinya kebocoran.

2.4 5 *Whys Analysis*

5 *Whys Analysis* merupakan teknik penggalian penyebab dengan mengajukan pertanyaan "mengapa" secara berulang. Jawaban pada satu tahap menjadi dasar untuk pertanyaan pada tahap berikutnya hingga ditemukan penyebab yang paling mendasar [8][9] . Teknik ini efektif dipadukan dengan *Fishbone Diagram* karena *Fishbone* mengidentifikasi faktor potensial,

ISSN 2338-7122

sedangkan 5 *Whys* memperdalam faktor yang paling relevan sampai akar penyebab dapat ditentukan [7][8].

3. Metode Penelitian

Penelitian dilakukan pada sistem HT *Water Cooling*, khususnya pipa HT *Water Cooling jacket outlet engine* Wärtsilä 18V50SG di PT X, Jl. Medan–Banda Aceh, Gate 5.3 PT PAG, Desa Meuria Paloh, Kecamatan Muara Satu, Kota Lhokseumawe, Aceh. Pengumpulan dan penelaahan data dilakukan pada 2–28 Februari 2026, dengan dokumen historis gangguan yang dianalisis mencakup Desember 2025–Januari 2026 [14].

Penelitian bersifat deskriptif kualitatif dengan pendekatan *Root Cause Analysis* (RCA). Data primer meliputi observasi kondisi sambungan pipa dan hasil wawancara teknisi/engineer pemeliharaan. Data sekunder meliputi histori rembesan dan kebocoran, temperatur HT Water, tekanan sistem, jam operasi, kondisi O-ring, dan catatan aktivitas pemeliharaan. Analisis dilakukan dalam empat tahap terpadu. Pertama, mendefinisikan kejadian kebocoran dan menyusun kronologi berdasarkan catatan historis. Kedua, mengelompokkan faktor potensial menggunakan *Fishbone Diagram* dalam kategori *Man, Machine, Method, Material, Measurement*, dan *Environment*. Ketiga, menelusuri hubungan sebab-akibat pada faktor yang paling relevan melalui pertanyaan berulang 5 *Whys*, lalu menguji kecocokannya secara kualitatif terhadap temuan. Keempat, menyusun tindakan korektif dan preventif serta menentukan urutan pelaksanaan berdasarkan kedekatan tindakan dengan akar penyebab, urgensi pencegahan kebocoran berulang, dan peran tindakan sebagai pengendalian pendukung. Tahapan ini mengikuti prinsip umum RCA untuk mengarahkan perbaikan pada penyebab sistemik [6][7][15].

3.1 Teknik Analisis Data

Analisis dilakukan melalui empat tahap. Pertama, identifikasi masalah untuk menetapkan kebocoran pipa HT *Water Cooling jacket Outlet* sebagai kejadian yang dianalisis. Kedua, identifikasi faktor penyebab menggunakan *Fishbone Diagram* berdasarkan kategori *Man, Machine, Method, Material, Measurement*, dan *Environment.* Ketiga, penentuan akar penyebab dengan 5 *Whys Analysis* terhadap faktor yang dominan. Keempat, penyusunan rekomendasi perbaikan dan pencegahan berdasarkan akar penyebab yang ditemukan. Tahapan tersebut mengikuti prinsip RCA yang menempatkan pengumpulan data, identifikasi faktor penyebab, penentuan *root cause*, dan rekomendasi sebagai rangkaian analisis yang saling berhubungan [6][15].

4. Hasil Penelitian dan Pembahasan

4.1 Data Historis Gangguan

Data historis digunakan untuk melihat pola gangguan dan kondisi yang menyertai kebocoran. Data yang tersedia menunjukkan bahwa gangguan berkembang dari rembesan pada *flange*, kondisi temperatur dan tekanan operasi, penurunan elastisitas oring, hingga kebocoran aktif. Setelah tindakan penggantian oring dan pemeriksaan, kondisi sistem kembali dinyatakan baik pada catatan berikutnya.

Tabel 1. Data Historis Gangguan Pipa HT *Water Cooling jacket Outlet* Desember 2025–Januari 2026

Tanggal	Kondisi/Temuan	Risiko
25-12-2025	Ditemukan rembesan pada *flange* pipa HT *Water Cooling jacket Outlet* di E#2 Cyl A (1-2).	*Warning / Medium Risk*

ISSN 2338-7122

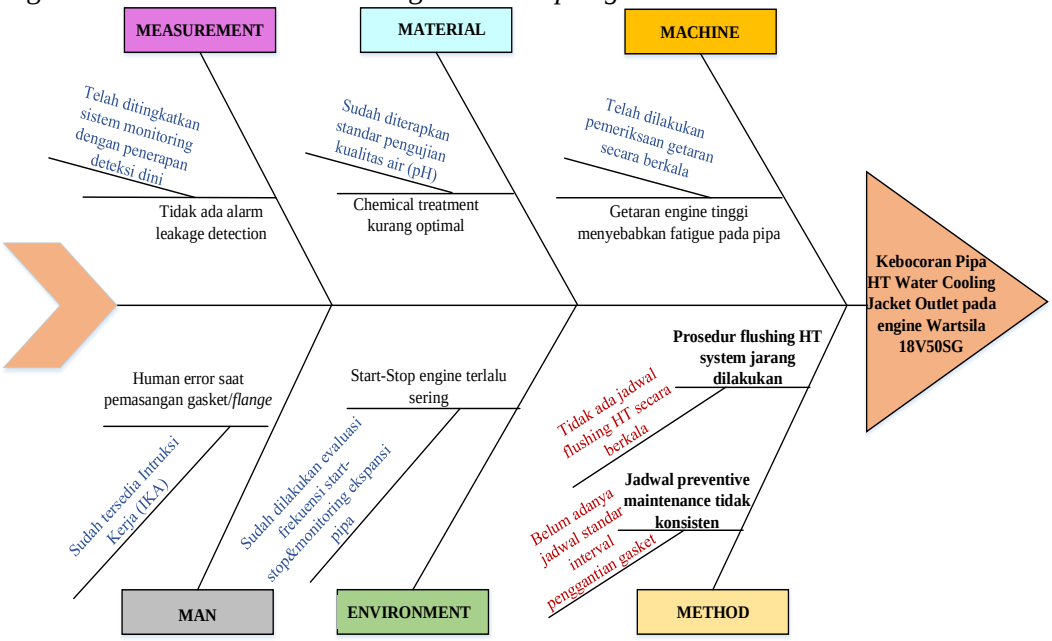
28-12-2025	Tekanan HT *Water* tercatat 3,9 bar saat *engine running* di E#7 Cyl B (6-7).	*Good / Medium Risk*
31-12-2025	Temperatur HT *Water* 86 °C (*after engine*) di E#5 Cyl B (8-9).	*Warning / Medium Risk*
05-01-2026	Oring sambungan *outlet* mengalami penurunan elastisitas di E#1 Cyl A (3-4).	*Warning / Medium Risk*
12-01-2026	Kebocoran aktif saat *engine* beban tinggi di E#3 Cyl A (2-3).	*Breakdown / High Risk*
18-01-2026	Penggantian oring pada sambungan pipa HT *Water Outlet* di E#7 Cyl B (4-5).	*Good / Low Risk*
23-01-2026	Pemeriksaan harian tidak ditemukan kebocoran di E#10 Cyl A (5-6).	*Good / Low Risk*

Sumber: Hasil observasi dan data operasional

Tabel 1 menunjukkan adanya rangkaian kondisi yang relevan dengan kejadian kebocoran. Rembesan pada *flange* muncul lebih awal, kemudian ditemukan temperatur HT *Water* sebesar 86 °C dan tekanan 3,9 bar. Penurunan elastisitas oring menjadi indikasi penting karena komponen sealing berfungsi menjaga kerapatan sambungan. Selanjutnya terjadi kebocoran aktif ketika *engine* berada pada beban tinggi. Pada data operasional, jam operasi *engine* telah mencapai 26.086 jam, sehingga umur pemakaian menjadi faktor yang perlu dipertimbangkan dalam menilai kondisi komponen [3][4].

4.2 Identifikasi Faktor Penyebab dengan *Fishbone Diagram*

Hasil pengelompokan faktor penyebab menunjukkan bahwa kebocoran tidak disebabkan oleh satu kondisi tunggal. Faktor *Man* berkaitan dengan kesalahan pemasangan gasket/*flange* dan pemeriksaan yang masih dominan visual. Faktor *Machine* berkaitan dengan getaran *engine* dan jam operasi yang tinggi. Faktor *Method* berkaitan dengan penggantian komponen yang belum terjadwal serta *flushing* HT *system* yang belum memiliki jadwal terstruktur. Faktor *Material* berkaitan dengan penurunan kualitas *sealing* dan *chemical treatment* yang kurang optimal. Faktor *Measurement* berkaitan dengan sistem deteksi dini dan akurasi pengukuran temperatur, sedangkan *Environment* berkaitan dengan *start-stop engine* dan *stress* termal.



Gambar 1. *Fishbone Diagram* Penyebab Kebocoran Pipa HT *Water Cooling jacket Outlet*
Sumber: Pengolahan data berdasarkan observasi dan data operasional

ISSN 2338-7122

Tabel 2. Ringkasan Faktor Penyebab Kebocoran Berdasarkan *Fishbone Diagram*

Faktor	Penyebab yang Teridentifikasi	Keterkaitan dengan Gangguan
Man	*Human error* saat pemasangan gasket/*flange*; inspeksi kebocoran masih dominan visual.	Sambungan dapat kurang rapat dan kebocoran kecil berpotensi berkembang.
Machine	Getaran *engine* dan umur operasi 26.086 jam.	Memicu *fatigue*, kelonggaran sambungan, dan memperbesar beban pada komponen.
Method	Penggantian komponen tidak terjadwal; *flushing* HT system belum terjadwal.	Komponen sealing dapat digunakan melebihi masa pakai dan korosi lebih sulit dikendalikan.
Material	Penurunan elastisitas oring/gasket; chemical treatment kurang optimal.	Kemampuan sealing menurun dan laju korosi dapat meningkat.
Measurement	Deteksi dini kebocoran belum optimal; sensor temperatur perlu dikalibrasi.	Kondisi abnormal dapat terlambat diketahui.
Environment	*Start-stop engine* berulang dan paparan panas.	Menimbulkan fluktuasi temperatur dan stress termal pada perpipaan.

Sumber: Pengolahan data

Dari keenam kategori tersebut, faktor *Method* dipandang paling dominan karena berhubungan langsung dengan sistem pengendalian umur komponen dan aktivitas pemeliharaan. Kondisi komponen sealing yang menurun dapat terdeteksi secara fisik, tetapi apabila tidak didukung interval penggantian preventif, komponen akan tetap digunakan sampai menunjukkan gejala kerusakan. Temuan ini sejalan dengan prinsip RCA bahwa penyebab yang berkaitan dengan sistem kerja perlu ditelusuri agar perbaikan tidak hanya menyelesaikan kejadian pada satu titik [6][9].

4.3 Analisis 5 *Whys* dan Penentuan *Root Cause*

5 *Whys* diterapkan pada kejadian kebocoran dengan menelusuri hubungan antara rembesan, kondisi *sealing*, *flushing*, dan sistem penjadwalan pemeliharaan. Hasil analisis diringkas pada Tabel 3.

Tabel 3. Analisis 5 *Whys* Kebocoran Pipa HT *Water Cooling jacket Outlet*

Tahap	Hasil Analisis
Masalah utama	Kebocoran pipa HT *Water Cooling jacket Outlet* pada *engine* Wärtsilä 18V50SG.
Why 1	Terjadi rembesan pada sambungan *flange* dan indikasi korosi pada bagian pipa.
Why 2	Kemampuan sealing gasket menurun dan kualitas air pendingin kurang terkontrol.
Why 3	Gasket digunakan dalam jangka waktu lama dan *flushing* HT *system* tidak dilakukan secara rutin.
Why 4	Penggantian komponen dan proses *flushing* belum memiliki jadwal yang terstruktur.
Why* 5 / *Root cause	Belum ada standar interval penggantian gasket berbasis jam operasi dan belum ada SOP *flushing* HT *system* secara berkala.

ISSN 2338-7122

Sumber: Pengolahan data

Hasil 5 *Whys* memperlihatkan bahwa kejadian kebocoran memiliki hubungan sebab-akibat yang berurutan. Penurunan kemampuan *sealing* dan korosi merupakan kondisi yang terlihat pada komponen, tetapi penyebab yang lebih mendasar berada pada sistem pemeliharaan. Tidak adanya standar interval penggantian preventif membuat gasket/oring dapat digunakan lebih lama, sedangkan *flushing* yang tidak terjadwal membuat pengendalian kualitas sistem pendingin menjadi kurang konsisten. Dengan demikian, *root cause* utama ditetapkan sebagai belum ditetapkannya standar penggantian preventif komponen *sealing*, dengan belum adanya SOP *flushing* berkala sebagai akar pendukung pada faktor *Method*.

4.4 Usulan Perbaikan

Usulan perbaikan diarahkan untuk menghilangkan penyebab pada level sistem, sekaligus mengurangi kemungkinan kebocoran berulang. Prioritas pertama adalah menetapkan interval penggantian gasket/oring berbasis jam operasi *engine* dan memasukkannya ke dalam *preventive maintenance*. Langkah tersebut secara langsung menanggapi *root cause* yang ditemukan. Selain itu, *flushing* HT *system* perlu memiliki SOP dan jadwal yang terdokumentasi agar kualitas air pendingin dapat dikendalikan secara konsisten [7][8] .

Tabel 4. Usulan Perbaikan Berdasarkan Hasil RCA

Prioritas	Tindakan Perbaikan	Tujuan
1	Menetapkan interval penggantian gasket/oring berbasis jam operasi dan mengintegrasikannya ke *preventive maintenance*.	Mencegah komponen *sealing* digunakan melebihi masa pakai.
2	Menyusun SOP dan jadwal *flushing* HT *system* serta pencatatan hasil *flushing*.	Mengendalikan kualitas sistem dan menekan potensi korosi.
3	Melakukan pengujian kualitas air pendingin, termasuk pH dan parameter kimia terkait.	Memastikan *chemical treatment* bekerja optimal.
4	Memeriksa getaran jalur pipa dan memperkuat *support* pipa bila diperlukan.	Mengurangi *fatigue* akibat vibrasi *engine*.
5	Menerapkan standar pemasangan gasket/*flange* menggunakan *torque wrench* sesuai spesifikasi.	Menjaga kualitas *sealing* dan kekencangan sambungan.
6	Meningkatkan *monitoring* tekanan dan temperatur serta inspeksi visual *flange* dan pipa.	Mempercepat deteksi indikasi kebocoran.

Sumber: Pengolahan data dan usulan perbaikan

Tahapan pelaksanaan yang diusulkan dimulai dengan inventarisasi jenis serta spesifikasi gasket/O-ring dan pemeriksaan histori jam pakainya, dilanjutkan penentuan interval preventif oleh tim pemeliharaan mengacu pada pedoman pabrikan dan kondisi aktual. Tahap berikutnya adalah penyusunan SOP *flushing* dan formulir pencatatan, disertai pemeriksaan parameter kualitas air sesuai persyaratan operasi. Selanjutnya dilakukan evaluasi getaran dan support pipa, standardisasi pemasangan *flange* menggunakan prosedur pengencangan yang tepat, serta penguatan pemeriksaan temperatur, tekanan, dan indikasi rembesan. Setiap tindakan perlu dicatat dan dievaluasi melalui kejadian kebocoran berulang, hasil inspeksi sealing, serta kepatuhan

jadwal. Penelitian ini belum menguji hasil implementasi, sehingga efektivitas usulan masih memerlukan evaluasi setelah penerapan [5][13][15].

5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis, kebocoran pada pipa HT *Water Cooling jacket Outlet engine* Wärtsilä 18V50SG dipengaruhi oleh faktor *Man, Machine, Method, Material, Measurement*, dan *Environment*. Faktor *Method* menjadi faktor dominan karena sistem pemeliharaan belum memiliki penggantian preventif yang konsisten dan *flushing* HT *system* belum memiliki jadwal terstruktur. Hasil 5 *Why*s menunjukkan bahwa akar penyebab utama adalah belum ditetapkannya standar interval penggantian preventif gasket/oring berbasis jam operasi, sehingga komponen *sealing* dapat digunakan melebihi masa pakai dan mengalami penurunan kemampuan *sealing*. Usulan perbaikan utama adalah menetapkan interval penggantian gasket/oring, menerapkan SOP *flushing*, melakukan pengujian kualitas air, memeriksa getaran dan kekencangan *flange*, menggunakan *sparepart* sesuai standar, serta meningkatkan *monitoring* temperatur, tekanan, dan inspeksi visual. Implementasi tindakan tersebut diharapkan dapat mengurangi risiko kebocoran berulang dan meningkatkan keandalan sistem HT *Water Cooling.*

Referensi

[1] Hafiz, D., Rekayasa Pembangkit Energi Jurusan Teknik Elektro, T., & Negeri Lhokseumawe, P. (2024). Simulasi *Relay Deferensial* Akibat Gangguan Internal Pada Generator Di PT Sumber Daya Sewatama Sumbagut 2 Peaker Power Plant 250 MW. 8(1).

[2] Febriana, F., & Hardi, S. (2022). Analisis Sistem Kontrol Dan Instrumentasi *Preheater* Pada *Engine* Di PT. Sumberdaya Sewatama Sumbagut 2 Peaker 250 MW. Jurnal TEKTRO, 06(02).

[3] Satriawan, G. (2021). Pengaruh Rusaknya Oring *Connecting Jacket Cooling Fresh Water Main Engine Cylinder* No. 7 Terhadap Mesin Di MV. SENDANG MAS. Skripsi.

[4] Rahmad, N. (2025). Analisis Kegagalan Mesin Menggunakan Metode *Root Cause Analysis*. *Journal of Engineering Science and Technology Management*.

[5] Ito, A., Hagström, M., Bokrantz, J., Skoogh, A., Nawcki, M., Gandhi, K., Bergsjö, D., & Bärring, M. (2022). Improved root cause analysis supporting resilient production systems. *Journal of Manufacturing Systems*, *64*, 468–478.

[6] Pietsch, D. (2024). *Root Cause Analysis in Industrial Manufacturing: A Systematic Approach. Applied Sciences*, 8(6), 277. MDPI.

[7] De Fretes, R. A. (2022). Analisis Penyebab Kerusakan Transformator Menggunakan Metode RCA (*Fishbone Diagram and* 5-*Why Analysis*) di PT. PLN (Persero) Kantor Pelayanan Kiandarat. 16(2).

[8] Lilmumazzaini, F. (2025). Analisis *Breakdown* Selang *Plougshare* M109 di Pabrik Phonska I PT Petrokimia Gresik Menggunakan Metode RCA. X(2).

[9] Saputra, F. (2024). Analisis Cacat Produksi Menggunakan Metode 5 *Why*s. Jurnal Teknik Mesin Terapan, Universitas Merdeka Malang.

[10] Sakdiyah, S. (2022). Analisis Penyebab Masalah Menggunakan Metode *Fishbone Diagram*. Jurnal Aplikasi Teknik dan Bisnis Terapan.

[11] Caesarriani, C. (2025). Pengendalian Kualitas Produk Menggunakan Metode *Root Cause Analysis.* Jurnal Logika, Universitas Widyatama.

[12] Hanan Muhammad, & Jojo Sumarjo. (2025). Analisis Mesin *Door Poly Urethane* B Kulkas Satu Pintu Total *Productive Maintenance* Metode *Root Cause Analysis* (RCA) di PT. XYZ. Jurnal Pendidikan Teknik Mesin Undiksha, 13(1), 58–67. https://doi.org/10.23887/jptm.v13i1.90552

[13] Sitompul, M. (2024). Implementasi *Root Cause Analysis* untuk Mengurangi Produk *Reject*. Jurnal *Mine-Tech*, Universitas Muhammadiyah Surabaya.

ISSN 2338-7122

[14] Syahputra, R., & Studi Teknologi Rekayasa Pembangkit Energi, P. (2022). Pengaruh Suhu Terhadap Viskositas Minyak Pelumas *Shell Mysella* S3N40 Pada Mesin Gas *Type* W18V50SG Di PLTMG Sumbagut-2 Peaker. 06(01).

[15] Luo, D., He, M., Darko, J., Ly Seymour, F., & Maturana, F. (2024). The golden batch-driven root cause analysis for anomalies in bioreactor fermentation process. *Frontiers in Manufacturing Technology*, *4*, 1392038.

.