

**USULAN PEMELIHARAAN *ELBOW CONDENSER* PLTU XYZ
DENGAN METODE *RELIABILITY CENTERED MAINTENANCE (RCM)*
DAN *AGE REPLACEMENT***

TUGAS AKHIR

**Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Strata-1
Program Studi Teknik Industri Program Sarjana - Fakultas Teknologi Industri
Universitas Islam Indonesia**



Nama : Adrian Arif
No. Mahasiswa : 21522264

**PROGRAM STUDI TEKNIK INDUSTRI PROGRAM SARJANA
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
YOGYAKARTA
2025**

PERNYATAAN KEASLIAN

Saya mengakui bahwa tugas akhir ini adalah hasil karya saya sendiri kecuali kutipan dan ringkasan yang seluruhnya sudah saya jelaskan sumbernya. Jika dikemudian hari ternyata terbukti pengakuan saya ini tidak benar dan melanggar peraturan yang sah maka saya bersedia ijazah yang telah saya terima ditarik kembali oleh Universitas Islam Indonesia.

Yogyakarta, 20 Agustus 2025



Arifan Arif
21522264

SURAT BUKTI PENELITIAN



FAKULTAS
TEKNOLOGI INDUSTRI

Gedung KH. Mas Mansur
Kampus Terpadu Universitas Islam Indonesia
Jl. Kaliurang km 14,5 Yogyakarta 55584
T. (0274) 896444 ext. 4110, 4100
F. (0274) 895007
E. fti@uii.ac.id
WE fti.uii.ac.id

Nomor : 45/Ka.Lab IPO/70/Lab. IPO/VIII/2025

Hal : **Surat Keterangan Selesai Penelitian**

Assalamu'alaikum warahmatullahi wabarakatuh

Kami yang bertanda tangan di bawah ini Kepala Laboratorium Inovasi dan Pengembangan Organisasi (IPO) Program Studi Teknik Industri Universitas Islam Indonesia, dengan ini ingin memberitahukan bahwa mahasiswa di bawah telah melakukan Penelitian.

Nama Mahasiswa : Adrian Arif
NIM : 21522264
Program Studi : Teknik Industri-FT-UII
Tempat Penelitian : Laboratorium Inovasi dan Pengembangan Organisasi
Waktu Penelitian : 1-30 Juli 2025
Judul Penelitian : Usulan Pemeliharaan Elbow Condenser PLTU XYZ dengan Metode *Reliability Centered Maintenance* dan *Age Replacement*
Dosen pembimbing : Dr. Ir. Agus Mansur, S.T., M.Eng.Sc., IPU.

Demikian surat keterangan ini kami buat, agar dapat dipergunakan sebagaimana mestinya.

Wassalamu'alaikum warahmatullahi wabarakatuh

Yogyakarta, 19 Agustus 2025
Kepala Laboratorium IPO,

Wahyudhi Sutrisno, S.T., M.M., M.T.

LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING

**USULAN PEMELIHARAAN *ELBOW CONDENSER* PLTU XYZ
DENGAN METODE *RELIABILITY CENTERED MAINTENANCE (RCM)*
DAN *AGE REPLACEMENT***



Dosen Pembimbing

Dr. Ir. Agus Mansur, S.T., M.Eng.Sc., IPU
985220102

LEMBAR PENGESAHAN DOSEN PENGUJI

**USULAN PEMELIHARAAN *ELBOW CONDENSER* PLTU XYZ
DENGAN METODE *RELIABILITY CENTERED MAINTENANCE (RCM)*
DAN *AGE REPLACEMENT***

TUGAS AKHIR

Disusun Oleh :

Nama : Adrian Arif

No. Mahasiswa : 21 522 264

Telah dipertahankan di depan sidang penguji sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Strata-1 Teknik Industri Fakultas Teknologi Industri Universitas Islam Indonesia

Yogyakarta, 29 - 08 – 2025

Tim Penguji

Dr. Ir. Agus Mansur, S.T., M.Eng.Sc., IPU

Ketua

Nashrullah Setiawan, S.T., M.Sc., Ph.D.

Anggota I

Putri Dwi Annisa, S.T., M.Sc.

Anggota II

Mengetahui,

**Ketua Program Studi Teknik Industri Program Sarjana
Fakultas Teknologi Industri
Universitas Islam Indonesia**



Ir. Muhammad Ridwan Andi Purnomo, S.T., M.Sc., Ph.D., IPM

015220101

HALAMAN PERSEMBAHAN

Alhamdulillah rabbil ‘ālamīn, segala puji bagi Allah SWT atas rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini sebagai bagian dari pemenuhan studi di Program Studi Teknik Industri Program Sarjana, Universitas Islam Indonesia. Laporan ini saya persembahkan kepada keluarga tercinta, ayahanda Ditasmandri, S.T. dan ibunda Masdeliati, atas doa, dukungan, dan semangat yang selalu diberikan. Penghargaan juga penulis berikan kepada seluruh dosen Program Studi Teknik Industri Universitas Islam Indonesia yang telah membekali penulis dengan ilmu dan bimbingan selama masa perkuliahan, sahabat serta rekan seperjuangan yang turut memberikan dukungan, serta sosok yang senantiasa mendampingi, Anis Banowati, atas motivasi dan dorongan yang berharga dalam proses penyusunan tugas akhir ini. Secara khusus, penulis menyampaikan terima kasih kepada dosen pembimbing, Bapak Dr. Ir. Agus Mansur, S.T., M.Eng.Sc., IPU., atas arahan dan bimbingan yang diberikan hingga tugas akhir ini dapat terselesaikan dengan baik. Penulis berharap tugas akhir ini dapat memberikan manfaat bagi pembaca dan menjadi bentuk kontribusi dalam pengembangan ilmu pengetahuan di bidang Teknik Industri.

MOTTO

“Sesungguhnya Allah tidak akan mengubah keadaan suatu kaum sebelum mereka mengubah keadaan diri mereka sendiri.”

(QS. Ar-Ra’d: 11)

“Sesungguhnya Allah akan mengangkat derajat orang-orang yang beriman di antaramu dan orang-orang yang diberi ilmu beberapa derajat.”

(QS. Al-Mujadalah: 10)

“Education is the most powerful weapon which you can use to change the world”

(Nelson Mandela)

KATA PENGANTAR

Alhamdulillahillāhi rabbil ‘ālamīn, segala puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah Subhanahu Wa Ta’ala atas rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan tugas akhir dengan judul “*Usulan Pemeliharaan Elbow Condenser PLTU XYZ dengan Metode Reliability Centered Maintenance (RCM) dan Age Replacement*”.

Dalam proses pelaksanaan hingga penyusunan laporan ini, penulis memperoleh banyak bantuan, dukungan, dan bimbingan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, dengan penuh rasa hormat penulis menyampaikan terima kasih kepada:

1. Kedua orang tua yakni, Ayahanda Ditasmandri, S.T. dan Ibunda Masdeliati serta jajaran keluarga tercinta atas doa, dukungan materiil dan imateriil, serta motivasi yang tiada henti diberikan.
2. Pimpinan PLTU XYZ yang telah memberikan kesempatan kepada penulis untuk melaksanakan tugas akhir di perusahaan.
3. Bapak Prof. Dr. Hari Purnomo, M.T., IPU., ASEAN Eng., selaku Dekan Fakultas Teknologi Industri Universitas Islam Indonesia.
4. Bapak Ir. Muhammad Ridwan Andi Purnomo, S.T., M.Sc., Ph.D., IPM., selaku Ketua Program Studi Teknik Industri, Fakultas Teknologi Industri Universitas Islam Indonesia.
5. Bapak Dr. Ir. Agus Mansur, S.T., M.Eng.Sc., IPU., selaku dosen pembimbing yang telah memberikan bimbingan dan arahan dalam penyusunan laporan penelitian ini.
6. Sosok yang senantiasa mendampingi, Anis Banowati, atas doa, semangat, dan dukungan yang terus menguatkan penulis dalam menyelesaikan penelitian ini.
7. Rekan-rekan serta semua pihak, khususnya teman-teman MisalniMisal, yang telah membantu, memberikan semangat, dan mendukung penulis baik secara langsung maupun tidak langsung dalam pelaksanaan tugas akhir maupun penyusunan laporan ini.

Semoga segala kebaikan dan bantuan yang diberikan mendapatkan balasan yang berlipat ganda dari Allah SWT. Penulis menyadari laporan ini masih memiliki keterbatasan, oleh karena itu penulis dengan lapang hati menerima kritik dan saran yang membangun demi perbaikan di masa mendatang.

Yogyakarta, 20 Agustus 2025



Adrian Arif

NIM. 21522264

ABSTRAK

Elbow condenser pada PLTU XYZ merupakan komponen penting dalam sistem kondensasi yang berfungsi menyalurkan fluida pendingin, namun rentan mengalami kerusakan akibat korosi-erosi dari air laut dan kecepatan aliran yang tinggi. Selama ini perusahaan hanya menggunakan metode *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) untuk analisis kerusakan tanpa adanya langkah sistematis untuk mengusulkan strategi pemeliharaan, sehingga kerusakan berulang masih sering terjadi. Penelitian ini mengusulkan *Reliability Centered Maintenance* (RCM) yang dikombinasikan dengan *Age Replacement Method* untuk menekan *downtime*, meningkatkan keandalan, dan mengendalikan *life cycle cost* secara efisien.. Metode penelitian meliputi identifikasi kondisi komponen, analisis keandalan, penentuan mode kegagalan dominan, serta perhitungan interval pergantian optimal berdasarkan umur pakai dan biaya siklus hidup. Data penelitian diperoleh dari catatan operasional, inspeksi lapangan, serta literatur terkait sifat material dan pola kerusakan akibat erosi-korosi. Hasil analisis menunjukkan bahwa mode kegagalan dengan nilai *Risk Priority Number* (RPN) tertinggi adalah kebocoran pada *elbow condenser* dengan nilai 270 sehingga menjadi prioritas utama pemeliharaan yaitu berupa pergantian material dari *carbon steel* menjadi *stainless steel* 316L. Perhitungan dengan metode *age replacement* menghasilkan interval pemeliharaan setiap 62 hari untuk meminimalkan risiko kegagalan maupun biaya perawatan. Selain itu, penggunaan material *stainless steel* 316L (SS316L) terbukti lebih unggul dibandingkan *carbon steel* dengan ketahanan korosi 2,11 hingga 4,65 kali lebih tinggi dan *life cycle cost* lebih rendah, yaitu 4,39 dibandingkan 6,88 pada *carbon steel*.

Kata Kunci: *Elbow condenser, Reliability Centered Maintenance (RCM), Age Replacement, SS316L, Life Cycle Cost (LCC).*

DAFTAR ISI

PERNYATAAN KEASLIAN.....	i
SURAT BUKTI PENELITIAN	ii
LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING	iii
LEMBAR PENGESAHAN DOSEN PENGUJI	iv
HALAMAN PERSEMBAHAN.....	v
MOTTO.....	vi
KATA PENGANTAR.....	vii
ABSTRAK	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Manfaat Penelitian.....	3
1.5 Batasan Penelitian.....	3
1.6 Sistematika Penulisan	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Kajian Literatur.....	5
2.2 Landasan Teori	8
2.2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Uap	8
2.2.2 Siklus Rankine	9
2.2.3 Kondensasi.....	11
2.2.4 <i>Maintenance</i>	13
2.2.5 <i>Reliability Centered Maintenance (RCM)</i>	14
2.2.6 <i>Functional Block Diagram (FBD)</i>	16
2.2.7 <i>Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)</i>	16
2.2.8 <i>Logic Tree Analysis (LTA)</i>	18
2.2.9 <i>Task Selection (TS)</i>	19
2.2.10 Distribusi Kerusakan	19
2.2.11 <i>Uji Goodness of Fit</i>	20
2.2.12 <i>Mean Time to Failure (MTTF)</i>	22
2.2.13 <i>Mean Time to Repair (MTTR)</i>	22
2.2.14 <i>Age Replacement</i>	23
2.2.15 Perhitungan Interval Waktu Pemeliharaan	23
2.2.16 <i>Life Cycle Cost (LCC)</i>	24
BAB III METODE PENELITIAN.....	25
3.1 Pengumpulan Data.....	25
3.1.1 Data Primer.....	25
3.1.2 Data Sekunder.....	25
3.2 Objek Penelitian	26
3.3 Pengolahan Data	26
3.4 Alur Penelitian.....	27
BAB IV PENGUMPULAN DAN PENGOLAHAN DATA	30
4.1 Pengumpulan Data.....	30

4.1.1	Data Waktu Pemeliharaan Komponen elbow condenser	30
4.2	Pengolahan Data Penentuan Komponen Kritis	30
4.3	Pengolahan Data Penentuan Interval Pemeriksaan dan Pergantian Komponen.....	36
BAB V	PEMBAHASAN	56
5.1	Analisis <i>Functional Block Diagram</i> (FBD).....	56
5.2	Analisis <i>Failure Mode and Effect Analysis</i> (FMEA)	56
5.3	Analisis <i>Logic Tree Analysis</i> (LTA).....	57
5.4	Analisis <i>Task Selection</i>	58
5.5	Analisis Penentuan Tindakan Pencegahan	59
5.6	Analisis Distribusi <i>Time To Failure</i> dan <i>Time To Repair</i>	61
5.7	Analisis Uji Kecocokan <i>Goodness of Fit</i>	62
5.8	Analisis Parameter Distribusi TTF dan MTTF.....	62
5.9	Analisis Parameter Distribusi TTR dan MTTR.....	63
5.10	Analisis Interval Waktu Pergantian dan Pemeriksaan Komponen.....	63
5.11	Analisis Usulan Pergantian Material Komponen	64
BAB VI	PENUTUP	67
6.1	Kesimpulan.....	67
6.2	Saran	68
DAFTAR ISI		69
LAMPIRAN		71

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Siklus PLTU	8
Gambar 2. 2 Siklus Rankine PLTU.....	9
Gambar 2. 3 Skema Kondensasi PLTU	11
Gambar 2. 4 <i>Seven Question RCM</i>	15
Gambar 2. 5 <i>Roadmap Task Selection</i>	19
Gambar 3. 1 Alur Penelitian.....	27
Gambar 4. 1 <i>Functional Block Diagram (FBD)</i>	31
Gambar 5. 1 Grafik Perbandingan Material <i>Elbow Condenser</i>	64

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Kajian Literatur	5
Tabel 2. 2 Kategori <i>Critically Analysis</i>	16
Tabel 2. 3 Kriteria Utama RPN	17
Tabel 4. 1 Data Waktu Kerusakan Komponen.....	30
Tabel 4. 2 Penilaian FMEA.....	31
Tabel 4. 3 <i>Logic Tree Analysis (LTA)</i>	33
Tabel 4. 4 <i>Task Selection (TS)</i>	34
Tabel 4. 5 <i>Time to Failure</i> Komponen <i>Elbow Condenser</i>	36
Tabel 4. 6 <i>Time to Failure</i> Distribusi Eksponensial.....	37
Tabel 4. 7 <i>Time to Failure</i> Distribusi Normal.....	38
Tabel 4. 8 <i>Time to Failure</i> Distribusi Lognormal	39
Tabel 4. 9 <i>Time to Failure</i> Distribusi Weibull	40
Tabel 4. 10 <i>Index of Fit Time to Failure</i>	41
Tabel 4. 11 <i>Time to Repair</i> Komponen <i>Elbow Condenser</i>	42
Tabel 4. 12 <i>Time to Repair</i> Distribusi Eksponensial.....	43
Tabel 4. 13 <i>Time to Repair</i> Distribusi Normal.....	44
Tabel 4. 14 <i>Time to Repair</i> Distribusi Lognormal	45
Tabel 4. 15 <i>Time to Repair</i> Distribusi Weibull.....	46
Tabel 4. 16 <i>Index of Fit Time to Repair</i>	47
Tabel 4. 17 <i>Kolmogorov-Smirnov Time to Failure</i>	48
Tabel 4. 18 <i>Kolmogorov-Smirnov Time to Repair</i>	48
Tabel 4. 19 Interval Pergantian Komponen Menggunakan ARP	52
Tabel 5. 1 Usulan Tindakan Pemeliharaan.....	59
Tabel 5. 2 Hasil Distribusi <i>Time to Failure</i>	61
Tabel 5. 3 Hasil Distribusi <i>Time to Repair</i>	61
Tabel 5. 4 Nilai Parameter TTF dan MTTF	62
Tabel 5. 5 Nilai Parameter TTR dan MTTR	63
Tabel 5. 6 Rasio Perbandingan Biaya Material.....	66

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

PLTU XYZ merupakan pembangkit listrik tenaga uap berbasis siklus termal Rankine, yang menggunakan air laut sebagai media pendingin dalam sistem kondensasinya. Proses kondensasi di PLTU ini terjadi setelah uap air yang telah digunakan untuk memutar turbin diekspansi dan keluar dari sisi belakang turbin dengan tekanan dan temperatur rendah. Uap tersebut selanjutnya dialirkan ke kondensor untuk dikondensasikan kembali menjadi air (kondensat) yang akan digunakan ulang sebagai umpan *boiler* (air pengisi ketel).

Kondensor merupakan alat yang berfungsi mengubah uap panas kembali menjadi air dengan prinsip kerja atau proses perubahannya dilakukan dengan cara mengalirkan uap kedalam pipa (Ashfania, 2021). Kondensor yang digunakan di PLTU XYZ merupakan jenis *surface condenser*, yaitu kondensor dengan sistem penukar panas tidak langsung. Salah satu komponen kondensor adalah *elbow condenser*, yang berperan sebagai jalur aliran air pendingin dari dan menuju kondensor. Keandalan *elbow condenser* sangat mempengaruhi kelancaran proses perpindahan panas serta kestabilan tekanan balik (*back pressure*) pada turbin uap.

Namun, dalam praktik operasionalnya *elbow condenser* pada PLTU XYZ sering mengalami kerusakan berupa retakan (*cracking*) dan kebocoran akibat korosi-erosi. Korosi-erosi merupakan proses pengikisan material yang diinduksi melalui aliran (Aryanto, 2019). Kerusakan ini disebabkan oleh sifat korosif air laut serta kecepatan aliran fluida yang tinggi pada area *elbow*. Fenomena tersebut mempercepat proses degradasi material sehingga menurunkan efektivitas perpindahan panas dan berpotensi mengganggu kinerja pembangkit secara keseluruhan. Dampaknya, sirkulasi pendingin dapat terganggu, temperatur kondensor meningkat, proses kondensasi tidak optimal, dan tekanan balik turbin naik sehingga menurunkan efisiensi pembangkitan listrik.

Sejauh ini, perusahaan hanya menggunakan metode *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) untuk menganalisis kerusakan yang terjadi pada komponen, khususnya *elbow condenser*. Namun, penerapan FMEA terbatas pada tahap identifikasi dan analisis mode kegagalan tanpa adanya tindak lanjut berupa strategi pemeliharaan yang terencana. Kondisi ini menyebabkan perusahaan cenderung bergantung pada *corrective maintenance*,

yaitu perbaikan setelah kerusakan terjadi. Akibatnya, pemeliharaan yang tidak terjadwal membuatnya belum mampu mencegah kerusakan berulang secara efektif, sehingga *elbow condenser* tetap rentan mengalami kebocoran dan retakan. Dampaknya, *downtime* meningkat, biaya operasional bertambah, dan efisiensi sistem pembangkit berkurang karena kurangnya penerapan pemeliharaan secara prediktif maupun preventif.

Untuk mengatasi hal tersebut, diperlukan pendekatan pemeliharaan yang lebih sistematis, yaitu *Reliability Centered Maintenance* (RCM). Metode ini juga menggunakan *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) sebagai salah satu *tools* untuk mengidentifikasi mode kegagalan. Metode RCM memberikan langkah sistematis untuk melakukan pemilihan strategi pemeliharaan yang sesuai dengan fungsi kritis komponen. RCM diterapkan melalui empat tahapan utama: *Functional Block Diagram* (FBD) untuk pemetaan fungsi sistem, FMEA untuk analisis kegagalan, *Logic Tree Analysis* (LTA) untuk klasifikasi risiko kegagalan, serta *Task Selection* (TS) untuk menentukan strategi pemeliharaan yang tepat.

Selain itu, untuk menentukan interval perawatan yang paling efektif, digunakan *Age Replacement Method* (ARM). Metode ini memungkinkan penentuan waktu optimal penggantian komponen sebelum terjadi kegagalan total, dengan mempertimbangkan distribusi umur pakai, *Mean Time To Failure* (MTTF), serta *Mean Time To Repair* (MTTR). Dengan demikian, pemeliharaan dapat dilakukan secara preventif dan terjadwal sehingga risiko kerusakan dapat diminimalkan, *downtime* berkurang, serta efisiensi operasional pembangkit tetap terjaga.

Dengan mengombinasikan metode *Reliability Centered Maintenance* (RCM) dan *Age Replacement Method* (ARM), strategi pemeliharaan pada *elbow condenser* diharapkan mampu meminimalisir potensi kegagalan maupun kerusakan, sekaligus menjaga keandalan kinerja komponen dalam jangka panjang yang berpengaruh terhadap pengendalian *life cycle cost*, yaitu biaya yang mencakup keseluruhan siklus hidup komponen. Dengan demikian, pemeliharaan menjadi lebih terencana, efisien, dan berkelanjutan sehingga mampu menekan biaya operasional serta meminimalisir kerugian akibat *downtime* atau perbaikan mendadak.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian diatas, berikut merupakan rumusan masalah pada penelitian ini:

1. Apa saja jenis dan penyebab kerusakan yang sering terjadi pada *elbow condenser*, serta apa dampaknya terhadap sistem pembangkit?

2. Perawatan seperti apa yang paling tepat dilakukan untuk mencegah kerusakan pada *elbow condenser* agar sistem tetap berjalan dengan baik?
3. Bagaimana menentukan waktu yang paling efektif untuk melakukan pemeliharaan agar kerusakan bisa dicegah dan keandalan komponen tetap terjaga?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan permasalahan diatas berikut merupakan tujuan dibuatnya penelitian ini:

1. Mengetahui jenis-jenis dan penyebab kerusakan yang sering terjadi pada *elbow condenser*, serta memahami dampaknya terhadap sistem pembangkit.
2. Mengusulkan bentuk pemeliharaan yang paling sesuai untuk mencegah kerusakan pada *elbow condenser* agar sistem tetap berjalan secara optimal.
3. Mengusulkan waktu pemeliharaan yang paling efektif agar kerusakan dapat dicegah, waktu henti dapat dikurangi, dan keandalan komponen dapat terjaga.

1.4 Manfaat Penelitian

Diharapkan penelitian ini dapat memberikan manfaat baik bagi peneliti, pembaca, dan perusahaan. Adapun manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menambah wawasan, pengetahuan, dan pengalaman dalam implementasi keilmuan Teknik Industri pada PLTU yang dipelajari selama di perkuliahan sehingga dapat lebih memahami bagaimana cara memecahkan masalah industri secara nyata di lapangan.
2. Memberikan informasi yang jelas mengenai jenis kerusakan, penyebab, dan dampak pada *elbow condenser*.
3. Membantu perusahaan dalam menentukan jenis dan waktu pemeliharaan yang tepat untuk mencegah kerusakan sehingga dapat meningkatkan keandalan dan kinerja sistem kondensasi di PLTU.

1.5 Batasan Penelitian

Berdasarkan keterbatasan dan ketentuan dari perusahaan tempat penelitian berikut merupakan batasan dari penelitian ini:

1. Penelitian ini dilakukan pada komponen *elbow condenser* di PLTU XYZ
2. Penelitian akan berfokus pada analisis prediktif mengenai kerusakan dan pemeliharaan.
3. Penelitian akan menggunakan metode *Reliability Centered Maintenance* (RCM) dan *Age Replacement* (ARM).
4. Analisis akan mencakup dampak pada proses kondensasi yang dilakukan pada unit 3A PLTU.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dalam laporan penelitian umumnya mencakup beberapa bab utama untuk menguraikan proses dan hasil penelitian. Berikut penjelasan singkat tiap bagiannya:

BAB I Pendahuluan

Pada bab ini berisi mengenai pendahuluan mengapa penelitian ini dilakukan. Mulai dari Latar Belakang, Rumusan Masalah, Tujuan Penelitian, Manfaat Penelitian, dan Batasan Penelitian, serta Sistematika Penulisan.

BAB II Tinjauan Pustaka

Berisi acuan atau prinsip dasar dalam melakukan penelitian ini yang berisi Kajian Literatur dan Landasan Teori.

BAB III Metode Penelitian

Memuat metode yang digunakan pada penelitian ini seperti obyek penelitian, data yang digunakan, dan tahapan yang ada dalam melakukan penelitian ini secara ringkas dan jelas.

BAB IV Pengumpulan dan Pengolahan Data

Proses pengumpulan dan pengolahan data dengan langkah-langkah yang diperlukan. Dimana pengumpulan dan pengolahan data ini dilakukan dengan pengambilan sampel dan analisis data yang diperoleh perusahaan.

BAB V Pembahasan

Bab ini berisi mengenai pembahasan berdasarkan hasil dari pengumpulan dan pengolahan data yang sudah dianalisis sehingga mendapatkan hasil dari penelitian ini.

BAB VI Penutup

Berisi tentang kesimpulan dan saran berdasarkan hasil dari penelitian ini. Kesimpulan dan saran yang diberikan berisikan jawaban dari rumusan masalah yang telah dirancang.

DAFTAR PUSTAKA Berisi mengenai sumber-sumber pustaka yang digunakan dalam penelitian ini.

LAMPIRAN Berisikan seluruh hasil dokumentasi seperti tabel, gambar, proses penelitian dan lainnya yang perlu dilampirkan untuk memperjelas uraian dalam laporan penelitian ini.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kajian Literatur

Kajian ini menjadi acuan dan prinsip dalam penelitian yang dilakukan, berikut kajian literatur pada penelitian ini:

Tabel 2. 1 Kajian Literatur

Penulis	Obyek (Industri)		Metode		
	Pembangkit Listrik	Manufaktur	RCM	FMEA	Age Replacement
(Arinta, 2020)	√		√	√	√
(Pasaribu, 2021)		√		√	
(Utama, 2021)	√		√	√	
(Nirwana, 2022)	√			√	
(Nicola, 2022)	√		√	√	√
(Suseno, 2022)		√		√	
(Zamani, 2022)		√			√
(Answari, 2023)	√				√
(Erlangga, 2023)	√		√	√	√
(Muhammad, 2023)		√			√
(Rachmat, 2023)	√		√	√	√
(Simanungkalit, 2023)		√	√	√	
(Alwi, 2024)		√	√	√	
(Hendarti, 2024)	√			√	
(Sukmawati, 2024)	√		√	√	
Penelitian Ini	√		√	√	√

Pemeliharaan sistem dalam industri pembangkit listrik, khususnya Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), telah mengalami transformasi signifikan melalui pendekatan berbasis keandalan (*reliability-based maintenance*). Berbagai studi mutakhir

menunjukkan bahwa penggunaan metode seperti *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA), *Reliability Centered Maintenance* (RCM), serta analisis kuantitatif berupa *Reliability, Maintainability, dan Availability* (RMA), semakin menjadi fondasi dalam merancang strategi pemeliharaan yang tidak hanya reaktif, tetapi juga prediktif dan preventif.

Salah satu kontribusi penting dalam penerapan FMEA dapat dilihat pada penelitian Hendarti (2024), yang merancang sistem pemeliharaan pulverizer model MVM31F. Penelitian ini mengidentifikasi sepuluh mode kegagalan potensial dengan nilai kritis RPN mencapai 69,2, di mana *classifier* dan *grinding roller* merupakan dua komponen dengan tingkat risiko tertinggi. Dengan menggabungkan *Logic Tree Analysis* (LTA), studi ini berhasil mengklasifikasikan kegagalan menjadi kategori *Time-Directed* dan *Condition-Directed Maintenance*. Hal ini menunjukkan bahwa perencanaan pemeliharaan yang disesuaikan dengan jenis kegagalan dapat memberikan kontribusi signifikan terhadap peningkatan sistem keandalan operasional.

Dalam konteks keandalan sistem penghisap udara, Rachmat (2023) mengevaluasi komponen *Induced Draft* (ID) *Fan Boiler* menggunakan pendekatan RMA. Hasilnya menunjukkan bahwa sebelum dilakukan tindakan preventif, keandalan komponen seperti *bearing*, *oil seal*, dan *V-belt* berada di bawah ambang aman (<50%). Namun, melalui penjadwalan ulang pemeliharaan berbasis *Time To Repair* (TTR), nilai keandalan dan *availability* meningkat secara signifikan hingga melampaui 99%. Penelitian ini memperkuat argumen bahwa pendekatan kuantitatif berbasis histori kerusakan sangat efektif untuk menetapkan interval pemeliharaan yang lebih presisi dan efisien secara ekonomi.

Lebih lanjut, Nicola (2022) melakukan analisis keandalan terhadap komponen *Submerged Scraper Conveyor* (SSC) di PLTU dengan pendekatan RCM dan FMEA, serta pengukuran *Mean Time To Failure* (MTTF). Hasilnya menunjukkan bahwa chain SSC memiliki MTTF sebesar 8.044,5 jam dan laju kegagalan sebesar $1,24 \times 10^{-4}$. Penelitian ini merekomendasikan penggantian rantai setiap 42.000 jam dan pengecekan ketegangan rantai secara mingguan sebagai upaya mempertahankan keandalan sistem di atas 80%. Strategi ini menunjukkan efektivitas tindakan pemeliharaan prediktif dalam mencegah unit *shutdown*, yang dapat berdampak pada hilangnya kapasitas produksi listrik.

Sementara itu, aspek kualitas air umpan juga menjadi sorotan penting dalam siklus PLTU. Nirwana (2022) menggunakan metode FMEA untuk menganalisis penyebab penurunan kualitas air, yang ditandai oleh deviasi parameter *Phosphate* (PO_4) dan Hydrazine (N_2H_4). Penyebab dominan berasal dari kegagalan sistem auto-injection (RPN = 648) serta kesalahan pembacaan sensor (RPN = 336). Studi ini menegaskan bahwa sistem kontrol kimia yang tidak berjalan optimal dapat mengganggu stabilitas termal boiler, sehingga evaluasi berkala terhadap sistem pengendali kualitas air menjadi prioritas penting dalam pemeliharaan siklus air PLTU.

Melengkapi tinjauan ini, Arinta (2020) mengusulkan strategi pemeliharaan komponen *Submerged Scraper Chain Conveyor* (SSCC) melalui integrasi RCM, FMEA, LTA, dan pendekatan *Age Replacement*. Dengan RPN tertinggi ditemukan pada komponen chain (192) yang diklasifikasikan sebagai hidden failure, penelitian ini mengusulkan interval pergantian setiap 3,15 bulan dan inspeksi setiap 23 hari. Hasilnya menunjukkan peningkatan keandalan sistem hingga 77,9% dan availability mencapai 99,4%, menandakan efektivitas strategi preventif berbasis umur komponen.

Penelitian-penelitian tersebut menyoroti bahwa strategi pemeliharaan yang terintegrasi antara analisis risiko kegagalan (FMEA), pendekatan prediktif (RCM dan *Age Replacement*), serta pengukuran kuantitatif terhadap keandalan sistem (RMA), telah menjadi arah utama dalam pengelolaan sistem peralatan kritis di PLTU. Selain mengurangi potensi *downtime*, pendekatan ini juga berperan dalam mengoptimalkan ketersediaan energi listrik, menjaga keselamatan operasi, serta mendukung efisiensi biaya operasional jangka panjang.

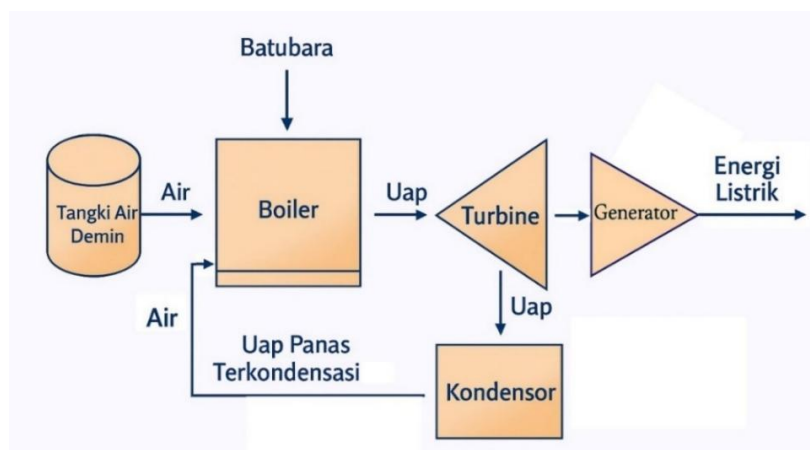
Berbeda dengan penelitian-penelitian sebelumnya, penelitian ini secara khusus berfokus pada komponen *elbow condenser* yang memiliki karakteristik kerusakan dominan berupa korosi dan retakan akibat kontak langsung dengan air laut. Perbedaan penting terletak pada penggunaan metode *Reliability Centered Maintenance* (RCM) yang tidak hanya berhenti pada identifikasi mode kegagalan melalui FMEA, tetapi juga dilanjutkan dengan tahapan *Functional Block Diagram* (FBD), *Logic Tree Analysis* (LTA), dan *Task Selection* (TS) untuk menentukan tindakan pemeliharaan yang paling sesuai. Selanjutnya, metode *Age Replacement* digunakan untuk menetapkan interval waktu optimal penggantian komponen berdasarkan perhitungan keandalan (*reliability function*) dan *downtime* minimal $D(tp)$. Dengan kombinasi ini, penelitian tidak hanya menjawab

pertanyaan “apa tindakan pemeliharaan yang harus dilakukan?” sebagaimana ditawarkan oleh RCM, tetapi juga “kapan tindakan tersebut sebaiknya dilakukan?” sebagaimana dihitung dengan *Age Replacement*. Pendekatan integratif ini diharapkan mampu menghasilkan strategi pemeliharaan yang lebih komprehensif, efektif, dan aplikatif pada kondisi operasional PLTU XYZ.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Uap

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) merupakan salah satu jenis pembangkit listrik yang menggunakan energi panas dari hasil pembakaran bahan bakar fosil, seperti batubara, untuk menghasilkan energi listrik melalui proses termodinamika siklus tertutup yang dikenal sebagai siklus *Rankine*. Proses pembangkitan listrik pada PLTU diawali dengan pembakaran batubara di dalam *boiler* yang menghasilkan energi panas untuk mengubah air menjadi uap bertekanan tinggi. Uap tersebut kemudian diarahkan ke turbin untuk menggerakkan poros yang terhubung dengan *generator*, sehingga menghasilkan energi listrik. Setelah energi kinetik uap digunakan dalam turbin, uap tersebut mengalami proses kondensasi di dalam kondensor dan dialirkan kembali ke *boiler* melalui *feedwater pump* untuk memulai kembali siklus konversi energi (Abbas, 2019).



Gambar 2. 1 Siklus PLTU

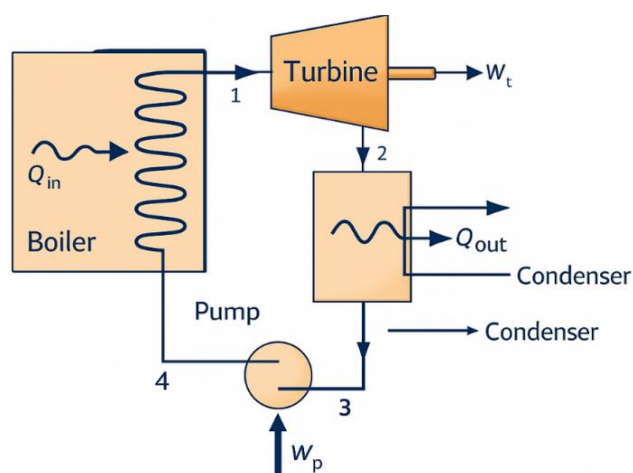
Efisiensi pembangkitan listrik pada PLTU sangat dipengaruhi oleh beberapa parameter teknis, di antaranya kualitas batubara, tekanan dan temperatur uap, serta performa sistem pembakaran dan peralatan utama seperti *boiler*, turbin, dan kondensor. Efisiensi energi dapat dianalisis melalui pendekatan perbandingan antara energi input berupa nilai kalor bahan bakar dengan energi output berupa daya listrik yang dihasilkan. Kualitas proses pembakaran memainkan peran kunci dalam menunjang efisiensi ini;

pembakaran yang tidak optimal dapat menyebabkan peningkatan emisi serta konsumsi bahan bakar yang lebih besar.

Dalam mendukung kinerja sistem pembangkitan, sistem penanganan batubara (*coal handling system*) memiliki peranan vital dalam menjamin kontinuitas pasokan bahan bakar dari titik penerimaan hingga ke ruang pembakaran (Lesmono, 2022). Sistem ini mencakup beberapa tahap, mulai dari pembongkaran batubara menggunakan *ship unloader*, pemindahan melalui *belt conveyor*, peremukan di *crusher*, pemisahan logam menggunakan *magnetic separator*, hingga proses pengumpanan ke *pulverizer*. Di dalam *pulverizer*, batubara digiling menjadi serbuk halus untuk meningkatkan luas permukaan pembakaran, sehingga proses pembakaran menjadi lebih cepat. Udara primer yang disuplai melalui *primary air fan* kemudian membawa debu batubara ke dalam *boiler*.

2.2.2 Siklus Rankine

Siklus Rankine merupakan salah satu siklus termodinamika yang paling umum digunakan dalam pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) untuk mengubah energi panas menjadi kerja mekanik. Siklus ini bekerja dalam sistem aliran tertutup dengan menggunakan air sebagai fluida kerja, karena memiliki sifat fisik dan kimia yang stabil serta efisien untuk proses perpindahan panas. Secara umum, siklus Rankine terdiri dari empat komponen utama, yaitu *boiler*, turbin, kondenser, dan pompa. Dalam *boiler*, fluida kerja dipanaskan hingga menjadi uap jenuh bertekanan tinggi. Uap ini kemudian diekspansikan secara isentropik di turbin untuk menghasilkan kerja mekanik. Setelah meninggalkan turbin, uap diarahkan ke kondenser untuk dikondensasikan secara isobarik menjadi cairan jenuh. Selanjutnya, cairan tersebut dikompresi oleh pompa secara isentropik hingga mencapai tekanan *boiler* dan kembali masuk ke tahap pemanasan, sehingga satu siklus penuh pun selesai.



Gambar 2. 2 Siklus Rankine PLTU

Tahap 1 ke 2 merupakan tahap ekspansi uap di Turbin, pada tahap ini uap bertekanan tinggi dan bersuhu tinggi yang telah dihasilkan oleh *boiler* dialirkan menuju turbin. Di dalam turbin, uap mengalami proses ekspansi isentropik, yaitu ekspansi tanpa perubahan entropi secara ideal. Selama proses ini, energi panas dalam uap diubah menjadi energi mekanik untuk memutar poros turbin. Hasil dari tahapan ini adalah kerja turbin (W_t) yang nantinya akan digunakan untuk menggerakkan generator listrik. Setelah melewati turbin, uap mengalami penurunan tekanan dan temperatur, dan keluar dalam bentuk uap basah menuju kondensor.

Tahap 2 ke 3 merupakan proses kondensasi uap di kondensor. Uap bertekanan rendah dari turbin kemudian masuk ke dalam kondensor. Di dalam kondensor, uap didinginkan menggunakan air pendingin (*cooling water*), yang berasal dari sumber eksternal seperti air sungai atau laut. Proses ini menyebabkan uap mengalami perubahan fase menjadi cair, melalui pelepasan panas laten kondensasi ke media pendingin. Hasil akhirnya adalah air jenuh (*saturated liquid*) pada tekanan rendah. Panas yang dilepaskan dari proses ini disebut sebagai Q_{out} , dan merupakan panas buangan dari sistem.

Tahap 3 ke 4 merupakan proses pemompaan cairan oleh pompa. Setelah terkondensasi menjadi cair, fluida kerja (air) masih berada pada tekanan rendah. Pompa digunakan untuk menaikkan tekanan air tersebut menuju tekanan yang dibutuhkan oleh boiler. Proses ini juga idealnya berlangsung secara isentropik, sehingga tidak terjadi perubahan entropi pada fluida. Meskipun energi yang digunakan oleh pompa (W_p) lebih kecil dibandingkan energi yang dihasilkan oleh turbin, tahapan ini penting untuk menjaga kontinuitas aliran dalam siklus. Hasil akhir dari tahap ini adalah air bertekanan tinggi dalam kondisi cair.

Tahap 4 ke 1 merupakan tahap pemanasan di *boiler*. Fluida kerja yang telah bertekanan tinggi kemudian masuk kembali ke boiler untuk melalui proses pemanasan. Di dalam *boiler*, fluida akan dipanaskan secara bertahap, mulai dari air subcooled, menjadi air jenuh, kemudian diuapkan dan dipanaskan lebih lanjut hingga mencapai kondisi uap kering atau bahkan *superheated*. Panas yang disuplai berasal dari pembakaran bahan bakar seperti batubara, gas alam, atau biomassa, dan ditandai dengan Q_{in} . Setelah menjadi uap bertekanan dan bersuhu tinggi, fluida kerja siap kembali memasuki turbin, dan siklus pun berulang. Efisiensi ternal siklus ini yang ideal adalah:

$$n = \frac{Q_{1-2} - Q_{4-1}}{Q_{1-2}} = 1 - \frac{1}{V_1/V_2^{k-1}} \quad (2.1)$$

Dimana:

Q_{1-2} = energi yang ditambahkan pada keadaan 1 – 2

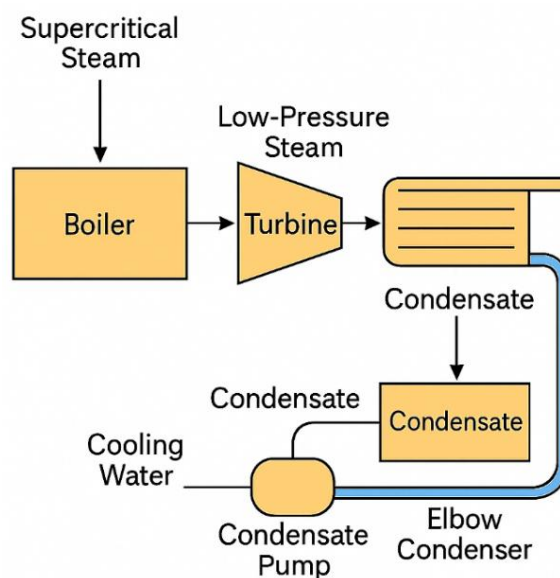
Q_{4-1} = energi yang dibuang pada keadaan 4 – 1

V_1/V_2 = Rasio kompresi

Sumber panas dalam siklus Rankine dapat berasal dari berbagai sumber energi, seperti bahan bakar fosil (batu bara, minyak, gas), nuklir, maupun panas matahari. Untuk mengevaluasi efisiensi sistem ini, dilakukan analisis eksergi, yaitu perhitungan terhadap kerja maksimum yang dapat diperoleh jika sistem mencapai kesetimbangan dengan lingkungan.

2.2.3 Kondensasi

Kondensasi adalah proses perubahan uap menjadi air melalui pendinginan. Dalam sistem PLTU, uap sisa dari turbin dialirkan ke kondensor untuk mengalami kondensasi, yaitu didinginkan dan dikembalikan ke bentuk cair sebagai air kondensat. Proses ini menggunakan air bersuhu rendah yang biasanya bersumber dari laut, danau, atau waduk. Dibutuhkan volume air yang besar agar pendinginan berlangsung secara efektif. Air kondensat yang dihasilkan kemudian dialirkan kembali ke *steam drum* pada *boiler* untuk digunakan ulang dalam siklus pembangkitan uap. Gambar 2.2 menggambarkan skema proses kondensasi pada PLTU.



Gambar 2. 3 Skema Kondensasi PLTU

Siklus kerja sistem Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) dengan fokus pada proses kondensasi dan sirkulasi ulang air menggunakan komponen *elbow condenser*. Siklus dimulai dari *boiler*, tempat uap superkritis (*supercritical steam*) dihasilkan melalui pemanasan air pada tekanan dan suhu sangat tinggi. Uap ini kemudian dialirkan menuju turbin, di mana terjadi ekspansi tekanan dan konversi energi panas menjadi energi mekanik. Setelah melewati turbin, uap menjadi bertekanan rendah dan diarahkan ke kondensor utama untuk dikondensasikan menjadi cairan (kondensat). Proses pendinginan ini dibantu oleh air pendingin (*cooling water*) yang bersirkulasi melalui jalur khusus, salah satunya melewati *elbow condenser*. Komponen ini berperan sebagai bagian dari sistem perpipaan yang mengatur aliran dan arah pendinginan.

Setelah proses kondensasi, air kondensat disalurkan ke dalam tangki penampungan sebelum dipompa kembali ke sistem oleh pompa kondensat (*condensate pump*). Kondensat ini kemudian dikembalikan menuju boiler untuk digunakan kembali dalam siklus pembangkitan. Siklus ini berlangsung terus menerus dalam sistem tertutup dan efisien. Keberadaan *elbow condenser* penting untuk memastikan kelancaran sirkulasi pendingin, menjaga efisiensi proses perpindahan panas, dan mendukung kinerja optimal sistem termal pembangkit listrik.

Dalam sistem PLTU *Ultra Supercritical*, proses kondensasi merupakan bagian krusial dari siklus Rankine yang berfungsi untuk mengubah uap sisa ekspansi turbin menjadi air (kondensat), yang kemudian digunakan kembali sebagai umpan ke *boiler*. Uap superkritis dengan tekanan tinggi (lebih dari 300 bar) dan temperatur tinggi (di atas 700°C) dihasilkan dari *boiler* dan dialirkan ke turbin untuk menghasilkan tenaga mekanik. Setelah proses ekspansi di turbin, tekanan uap turun drastis dan uap tersebut dialirkan ke kondensor.

Kondensor yang digunakan umumnya bertipe *surface condenser*, di mana uap bersentuhan dengan bagian luar pipa yang berisi aliran air pendingin (biasanya air laut). Proses perpindahan panas berlangsung secara tidak langsung: uap melepaskan panas laten ke air pendingin dan berubah fase menjadi air. Kondensat ini ditampung di dalam *hotwell*, kemudian dipompa kembali ke sistem oleh pompa kondensat untuk melanjutkan siklus.

Agar pendinginan berlangsung efektif, sistem sirkulasi air pendingin terus diatur secara konstan. Salah satu komponen penting dalam sistem ini adalah *elbow condenser*, yang mengarahkan aliran air pendingin ke dalam pipa-pipa kondensor dengan efisien,

menjaga kelancaran perpindahan panas. Secara termodinamika, proses kondensasi berlangsung pada tekanan konstan rendah di kondensor. Di dalam diagram T-s (temperatur vs entropi) siklus Rankine USC, tahapan ini digambarkan sebagai perubahan fasa dari uap jenuh menjadi cair jenuh tanpa perubahan tekanan yang signifikan merupakan bagian akhir dari siklus sebelum air kembali ke *boiler*.

2.2.4 Maintenance

Manajemen pemeliharaan mesin merupakan bagian penting dalam operasional industri untuk memastikan peralatan produksi selalu berada dalam kondisi optimal. Tujuan utamanya adalah mencegah kerusakan mendadak, memperpanjang umur mesin, menekan biaya perbaikan besar, serta menjaga keselamatan kerja dan efisiensi proses produksi (Nasution, 2021). Dengan sistem pemeliharaan yang baik, perusahaan dapat meminimalisasi gangguan operasional yang disebabkan oleh kerusakan mesin dan meningkatkan keandalan fasilitas produksi. Secara umum *maintenance* dapat dibagi dalam beberapa bagian, diantaranya adalah (Trianto, 2016):

1. *Preventive Maintenance* adalah suatu kegiatan pemeliharaan yang direncanakan baik itu secara rutin maupun periodik, karena apabila pemeliharaan dilakukan tidak sesuai waktu yang ditentukan akan menurunkan umur peralatan.
 - a. *Running Maintenance*, adalah pemeliharaan terhadap peralatan yang dilakukan tanpa menghentikan peralatan.
 - b. *Opportunity Maintenance*, adalah suatu kegiatan pemeliharaan terhadap peralatan yang rusak saja dalam satu unit tetapi unit produksi tetap melakukan kegiatan.
 - c. *Turning Around Maintenance*, adalah pemeliharaan terhadap peralatan yang sengaja dihentikan pengoperasiannya.
2. *Repair Maintenance* merupakan pemeliharaan yang dilakukan terhadap peralatan yang tidak kritis, atau disebut juga peralatan-peralatan yang tidak mengganggu jalannya operasi.
3. *Predictive Maintenance* merupakan kegiatan memprediksi, menguji, atau mengukur peralatan-peralatan yang beroperasi dengan menambahkan peralatan khusus pada bagian-bagian utama, apabila peralatan tersebut berjalan dengan tidak normal atau tidak stabil. Tujuannya adalah untuk memprediksi kapan peralatan akan mengalami kegagalan sehingga tindakan pemeliharaan bisa dilakukan sebelum kerusakan benar-benar terjadi.

4. *Corrective Maintenance* adalah pemeliharaan yang dilakukan setelah peralatan mengalami kegagalan total, dengan menambahkan komponen-komponen tambahan agar peralatan dapat berfungsi kembali. Prosesnya bisa meliputi pergantian komponen yang rusak atau penambahan elemen baru agar peralatan dapat kembali beroperasi.
5. *Breakdown Maintenance* merupakan tindakan dilakukan setelah terjadi kerusakan alat kemudian diperbaiki peralatan sehingga tidak dapat berfungsi seperti biasanya. Tindakan ini bersifat reaktif, dan biasanya menyebabkan *downtime* produksi yang cukup lama.
6. *Modification Maintenance* merupakan pekerjaan yang dilakukan dengan design dan modifikasi suatu peralatan unit untuk meningkatkan keandalan peralatan. Perubahan dilakukan untuk memperbaiki performa alat atau meningkatkan efisiensi operasional, termasuk menyesuaikan desain agar sesuai dengan kebutuhan terbaru.
7. *Shutdown Maintenance* adalah kegiatan pemeliharaan yang dilakukan hanya dalam waktu *shutdown* atau berhentinya kegiatan produksi. Jadi semua kegiatan pemeliharaan harus bisa diselesaikan selama proses *shutdown* tersebut.

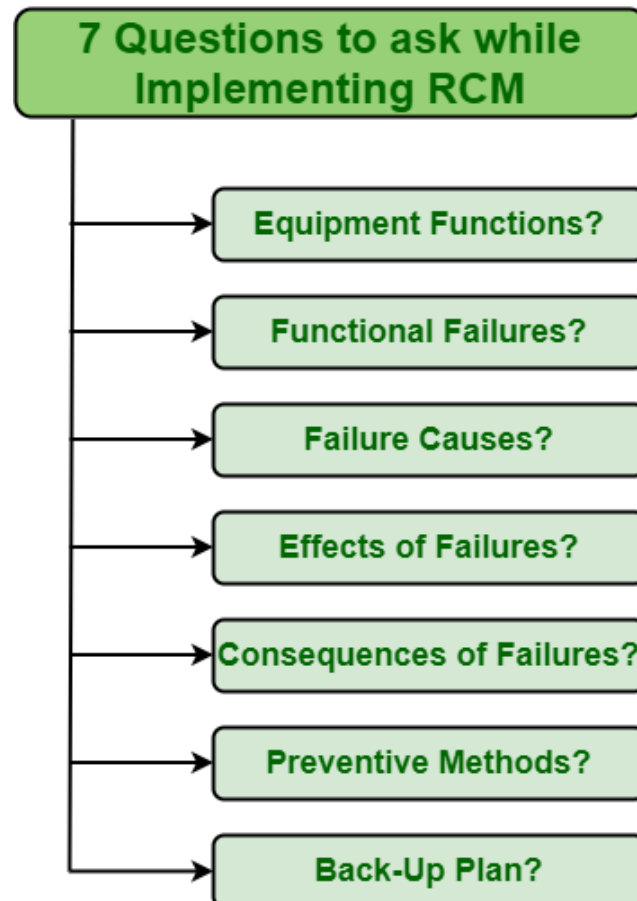
Dengan menerapkan strategi pemeliharaan yang efektif, perusahaan migas dapat mengurangi biaya operasional yang disebabkan oleh *downtime* tidak terduga dan memperpanjang masa pakai mesin. Selain itu, pemeliharaan yang baik juga berkontribusi pada peningkatan efisiensi energi, mengurangi konsumsi bahan bakar, dan memastikan kepatuhan terhadap standar keselamatan serta regulasi industri (Permana, 2024).

2.2.5 Reliability Centered Maintenance (RCM)

Perencanaan perawatan mesin merupakan aspek penting untuk menjaga ketersediaan dan keandalan mesin atau komponen. *Reliability Centered Maintenance* (RCM) menjadi dasar dalam penyusunan strategi perawatan preventif yang terjadwal. Metode ini berfungsi untuk menentukan tindakan perawatan yang paling tepat (Wicaksono, 2024). Metode ini bertujuan untuk menentukan jenis pemeliharaan yang paling tepat guna menjaga performa sistem atau peralatan agar tetap optimal dan berfungsi sebagaimana mestinya. Metode RCM memiliki beberapa tahap diantaranya:

- a. Mendeskripsikan sistem secara detail dengan *Functional Block Diagram* (FBD).
- b. Melakukan *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA).
- c. *Logic Tree Analysis* (LTA).
- d. *Task selection* (pemilihan tindakan).

Fokus utama dari metode ini adalah menjamin agar fungsi sistem tidak terganggu dengan cara mengenali berbagai potensi kegagalan (*failure mode*) serta menilai tingkat urgensinya berdasarkan seberapa kritis dampaknya. Gambar dibawah menguraikan implementasi metode RCM.



Gambar 2. 4 Seven Question RCM

Dalam penerapannya, RCM mengevaluasi setiap kemungkinan kegagalan untuk menilai dampak serta frekuensi terjadinya, sehingga kegagalan yang memiliki risiko tertinggi dapat ditangani secara prioritas. Adapun beberapa tujuan dari penerapan metode RCM antara lain (Afiva, 2019):

1. Menyusun prioritas dalam hubungan desain sistem guna mendukung pelaksanaan pemeliharaan preventif secara lebih terarah, khususnya pada level sub-rakitan (*sub-assembly*).
2. Menyediakan informasi yang bermanfaat bagi proses pengembangan desain komponen, terutama yang berkaitan langsung dengan pengguna, berdasarkan aspek keandalan (*reliability*).

3. Merancang tugas-tugas pemeliharaan preventif yang relevan dengan penurunan performa sistem, sehingga tetap mampu menjaga tingkat keandalan dan keselamatan operasi.

2.2.6 *Functional Block Diagram (FBD)*

Functional Block Diagram (FBD) adalah representasi visual dari fungsi-fungsi utama suatu sistem dalam bentuk blok-blok yang saling terhubung. Penyusunan diagram ini memerlukan beberapa tahapan identifikasi penting, yaitu Deskripsi sistem dan alur operasi sistem (Rudiana, 2024).

2.2.7 *Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)*

Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) adalah suatu teknik rekayasa yang digunakan untuk mengidentifikasi, menganalisis, dan mengeliminasi potensi kegagalan pada sistem, desain, proses, atau jasa sebelum berdampak pada pengguna. Metode ini berfokus pada pemetaan kemungkinan kegagalan beserta akibatnya, sehingga langkah pencegahan dapat dilakukan lebih awal guna meningkatkan keandalan dan kualitas secara keseluruhan (Hanif, 2015). Dalam metode FMEA, setiap potensi kegagalan dievaluasi berdasarkan tiga aspek utama, yaitu tingkat keparahan (*severity*), frekuensi terjadinya (*occurrence*), dan kemampuan deteksi (*detection*). Rumus yang digunakan untuk menghitung nilai *Risk Priority Number (RPN)* adalah sebagai berikut:

$$RPN = S \times O \times D \quad (2.2)$$

Melalui Perhitungan Nilai RPN, tingkat kritis pada unit juga bisa didapatkan, dengan rumus perhitungan sebagai berikut (Hendarti, 2024).

$$\text{Nilai} = \frac{\text{Total Nilai RPN}}{\text{Jumlah Failure Mode}} \quad (2.3)$$

Nilai RPN yang dihasilkan menunjukkan bagian-bagian atau komponen dengan tingkat risiko tertinggi. Komponen-komponen tersebut memerlukan perhatian khusus, seperti strategi pemeliharaan yang lebih intensif. Tabel berikut menunjukkan klasifikasi kategori tingkat kritis pada sebuah komponen.

Tabel 2. 2 Kategori *Critically Analysis*

<i>Critically (C)</i>		<i>Risk or Hazard</i>
<i>Degree of Critically</i>	<i>Value</i>	
<i>Minor</i>	0-30	<i>Acceptable</i>

<i>Medium</i>	31-60	<i>Tolerable</i>
<i>High</i>	61-180	
<i>Very high</i>	181-252	<i>Unacceptable</i>
<i>Critical</i>	253-324	
<i>Very Critical</i>	>324	

Pengaplikasian metode FMEA dalam menganalisis setiap potensi kegagalan terdiri dari tiga kriteria utama, yaitu:

1. *Severity* (S) adalah ukuran seberapa besar dampak yang ditimbulkan oleh suatu kegagalan. Penilaian dilakukan dengan skala 1–10, di mana nilai 1 menunjukkan dampak yang sangat kecil dan nilai 10 menunjukkan dampak yang sangat serius atau fatal.
2. *Occurrence* (O) mengukur seberapa sering atau seberapa besar kemungkinan kegagalan tersebut terjadi. Skala penilaian juga 1–10, dengan nilai 1 berarti sangat jarang terjadi, dan nilai 10 berarti hampir pasti terjadi dalam setiap siklus operasi.
3. *Detection* (D) adalah ukuran kemampuan sistem untuk mendeteksi kegagalan sebelum terjadi dampak yang signifikan. Skala 1–10, di mana nilai 1 berarti kegagalan sangat mudah dideteksi, dan nilai 10 berarti hampir tidak mungkin dideteksi sebelum terjadi dampak.

Tabel 2. 3 Kriteria Utama RPN

Aspek	Penjelasan	Skala Penilaian	Keterangan
<i>Severity</i> (S)	Mengukur tingkat keparahan dampak kegagalan terhadap sistem, keselamatan, atau proses.	1 (ringan) – 10 (sangat berat/fatal)	Nilai tinggi menunjukkan dampak kegagalan yang sangat serius.
<i>Occurrence</i> (O)	Mengukur frekuensi atau kemungkinan terjadinya kegagalan dalam periode waktu tertentu.	1 (sangat jarang) – 10 (sangat sering)	Nilai tinggi berarti kegagalan sering terjadi.

<i>Detection (D)</i>	Mengukur kemampuan sistem atau proses untuk mendeteksi kegagalan sebelum berdampak.	1 (mudah dideteksi) – 10 (sulit dideteksi)	Nilai tinggi berarti kegagalan sulit terdeteksi sebelumnya.
----------------------	---	--	---

2.2.8 *Logic Tree Analysis (LTA)*

Logic Tree Analysis (LTA) merupakan salah satu tahap dari metode *Reliability Centered Maintenance*. LTA merupakan metode analisis yang digunakan untuk menetapkan prioritas pada setiap mode kegagalan dengan meninjau fungsi serta dampak dari kegagalan tersebut (Violana, 2025). Proses ini dilakukan dengan menjawab serangkaian pertanyaan terkait apakah kegagalan dapat terdeteksi oleh operator dalam kondisi normal (*evident*), apakah menimbulkan risiko keselamatan (*safety*), serta apakah menyebabkan penghentian sebagian atau seluruh sistem operasi (*outage*). Dalam penetapan kategori keagalannya, dibagi menjadi 3 yaitu:

1. Kategori A – *Safety Problem*.

Mode kegagalan yang termasuk dalam kategori ini memiliki konsekuensi terhadap keselamatan personel maupun lingkungan. Kegagalan ini bersifat kritis dan harus segera ditangani karena potensi bahayanya tinggi.

2. Kategori B – *Outage Problem*.

Mode kegagalan berdampak pada operasional plant, baik dalam hal kuantitas maupun kualitas output, yang dapat menyebabkan kerugian ekonomi signifikan akibat downtime atau gangguan besar dalam proses produksi.

3. Kategori C – *Economic Problem*.

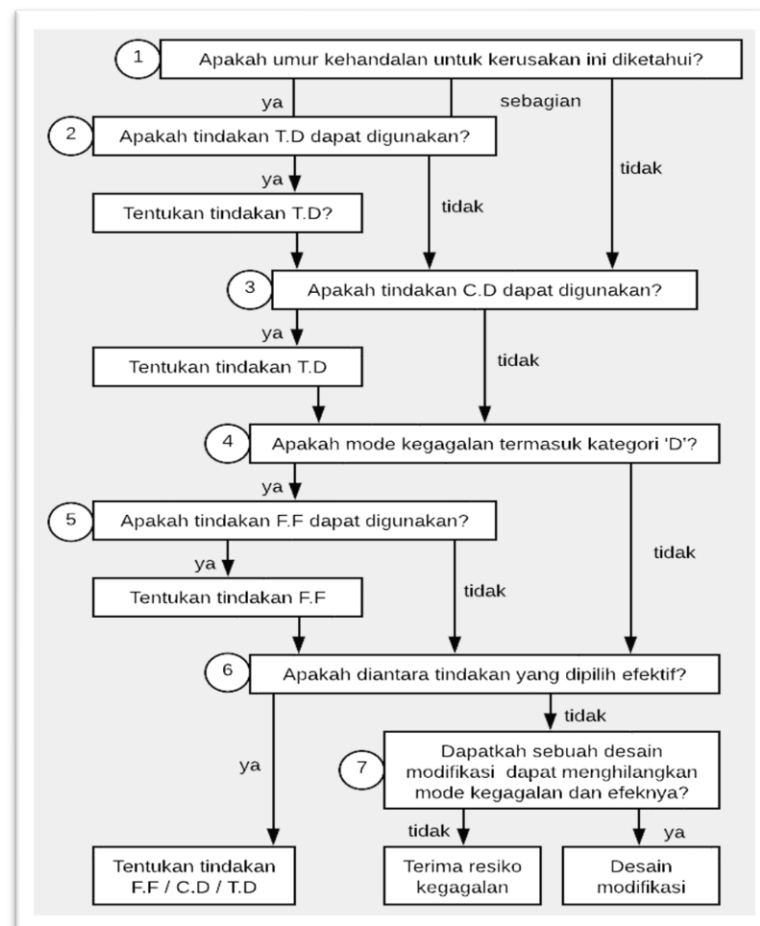
Kegagalan yang tidak berdampak pada keselamatan maupun operasional plant, tetapi tetap menimbulkan kerugian ekonomi, walaupun dalam skala relatif kecil. Perbaikannya dapat dijadwalkan tanpa urgensi tinggi.

4. Kategori D – *Hidden Failure*.

Merupakan mode kegagalan yang tidak langsung terdeteksi dalam kondisi normal dan bersifat tersembunyi. Kategori ini dibagi lagi menjadi tiga subkategori, yaitu D/A jika memiliki potensi terhadap keselamatan, D/B jika berdampak pada operasional plant, dan D/C jika hanya menimbulkan kerugian ekonomi kecil.

2.2.9 Task Selection (TS)

Task Selection merupakan tahapan pengambilan keputusan yang bertujuan untuk menentukan langkah atau tindakan yang paling sesuai dalam menangani suatu kegagalan (Siagian, 2024). Dalam proses ini, dilakukan penilaian terhadap keterkaitan jenis kegagalan dengan pendekatan pemeliharaan yang tepat, apakah melalui *Condition Directed* (CD), *Time Directed* (TD), atau *Finding Failure* (FF). Gambar 2.5 menunjukkan *road map task selection*:



Gambar 2. 5 Roadmap Task Selection

2.2.10 Distribusi Kerusakan

Distribusi kerusakan merupakan ekspresi matematis yang menggambarkan pola waktu terjadinya kegagalan pada suatu komponen/sistem (Wardana, 2024). Pola ini penting untuk mengetahui *reliability* (keandalan), merancang pemeliharaan, serta memperkirakan umur pakai. Distribusi yang sering digunakan adalah Normal, Lognormal, Weibull, dan Eksponensial, masing-masing punya karakteristik berbeda.

1. Distribusi Eksponensial

Distribusi eksponensial digunakan untuk memodelkan komponen yang memiliki laju kegagalan konstan, sehingga kemungkinan rusak tidak bergantung pada usia pakai. Cocok digunakan untuk sistem elektronik atau komponen yang gagal secara acak. Rumus fungsi keandalan distribusi eksponensial adalah:

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (2.4)$$

2. Distribusi Normal

Distribusi normal menggambarkan pola kegagalan yang umumnya mengikuti kurva berbentuk lonceng (*bell curve*), di mana laju kegagalan meningkat seiring bertambahnya umur komponen hingga mencapai puncak, lalu menurun kembali. Distribusi ini sesuai digunakan untuk menganalisis data kerusakan yang bersifat simetris. Rumus fungsi keandalan dituliskan sebagai:

$$R(t) = 1 - \Phi\left(\frac{t - \mu}{\sigma}\right) \quad (2.5)$$

3. Distribusi Lognormal

Distribusi lognormal digunakan untuk menggambarkan pola kerusakan yang tidak simetris, di mana umur kegagalan cenderung menyebar ke arah kanan (*right-skewed*). Distribusi ini memiliki dua parameter penting, yaitu *scale parameter* (s) dan *median time to failure* (t_{med}). Rumus fungsi keandalannya adalah:

$$R(t) = 1 - \Phi\left(\frac{1}{s} \ln \frac{t}{t_{med}}\right) \quad (2.6)$$

4. Distribusi Weibull

Distribusi *Weibull* sangat fleksibel karena dapat merepresentasikan berbagai bentuk distribusi kegagalan dengan parameter bentuk (β) dan parameter skala (η). Bila $\beta < 1$, menunjukkan kegagalan awal (*infant mortality*), $\beta = 1$ menunjukkan laju kegagalan konstan (seperti distribusi eksponensial), dan $\beta > 1$ menunjukkan laju kegagalan meningkat seiring waktu (*wear out*). Rumus fungsi distribusi kumulatifnya adalah:

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (2.7)$$

2.2.11 Uji Goodness of Fit

Goodness of Fit digunakan untuk mengukur suatu model yang mengindikasikan seberapa baik model tersebut menghasilkan ulang *observed covariance matrix* di antara indikator-indikator. Model dikatakan semakin baik (*fit*) jika nilai mendekati *estimated covariance matrix* (teori) dan *observed covariance matrix* (kenyataan) (Halim, 2019).

1. Uji Barlett untuk Distribusi Eksponensial

Uji Bartlett digunakan untuk menguji apakah data waktu kerusakan mengikuti distribusi eksponensial dengan cara melihat kesamaan varians antar data atau *homoskedastisitas*. Dalam konteks analisis keandalan, distribusi eksponensial sering digunakan untuk memodelkan waktu antar kegagalan dengan laju kerusakan yang konstan. Hipotesis yang diuji adalah H_0 : data mengikuti distribusi eksponensial, dan H_1 : data tidak mengikuti distribusi eksponensial. Nilai statistik uji dihitung dengan persamaan Bartlett yang melibatkan data waktu kerusakan (t_i) dan jumlah kerusakan (r). Keputusan diambil dengan membandingkan nilai B terhadap batas kritis distribusi chi-square, di mana H_0 diterima jika nilai uji berada dalam rentang yang ditentukan.

2. Uji Kolmogorov-Smirnov untuk Distribusi Normal dan Lognormal

Uji Kolmogorov-Smirnov (K-S) digunakan untuk menilai sejauh mana distribusi data sampel sesuai dengan distribusi teoritis, dalam hal ini distribusi normal atau lognormal. Prinsip uji ini adalah membandingkan fungsi distribusi kumulatif teoritis ($F(Z_i)$) dengan distribusi kumulatif empiris data ($S(Z_i)$), di mana selisih maksimum absolut antara keduanya menjadi nilai statistik uji L . Hipotesis yang diuji adalah H_0 : data mengikuti distribusi normal/lognormal, dan H_1 : data tidak mengikuti distribusi tersebut. Jika nilai L lebih kecil atau sama dengan nilai kritis dari tabel Kolmogorov-Smirnov, maka H_0 diterima, sehingga data dapat dinyatakan sesuai dengan distribusi normal atau lognormal.

3. Uji Mann's untuk Distribusi Weibull

Uji Mann's digunakan untuk memeriksa kesesuaian data waktu kerusakan dengan distribusi Weibull, yang dikenal fleksibel untuk menggambarkan pola kegagalan peralatan. Uji ini memanfaatkan sifat linearitas distribusi Weibull dalam bentuk logaritmik, sehingga memudahkan pengujian melalui perhitungan rasio nilai logaritma data waktu kerusakan. Hipotesis yang diuji adalah H_0 : data mengikuti distribusi Weibull, dan H_1 : data tidak mengikuti distribusi Weibull. Statistik uji M dihitung menggunakan perbedaan logaritma waktu kerusakan ($\ln t_{i+1} - \ln t_i$) serta pendekatan nilai Mann (M_i). Jika hasil perhitungan M sesuai dengan kriteria penerimaan, maka data dapat dinyatakan mengikuti distribusi Weibull.

2.2.12 Mean Time to Failure (MTTF)

Mean Time to Failure (MTTF) adalah waktu rata-rata yang dibutuhkan hingga suatu sistem atau komponen mengalami kerusakan atau gagal berfungsi. MTTF berperan penting dalam menilai tingkat keandalan suatu peralatan atau mesin. Namun, metode perhitungannya dapat bervariasi tergantung pada jenis distribusi kerusakan yang digunakan dalam analisis data. Setiap distribusi seperti eksponensial, normal, lognormal, maupun Weibull memiliki rumus tersendiri untuk menentukan nilai MTTF (Syarifuddin, 2022). Adapun rumus untuk menghitung MTTF adalah sebagai berikut:

1. Distribusi Eksponensial

$$MTTF = \frac{1}{\lambda} \quad (2, 8)$$

2. Distribusi Normal

$$MTTF = \mu \quad (2, 9)$$

3. Distribusi Lognormal

$$MTTF = t_{med} e^{\frac{s^2}{2}} \quad (2, 10)$$

4. Distribusi Weibull

$$MTTF = \theta \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \quad (2, 11)$$

2.2.13 Mean Time to Repair (MTTR)

Mean Time to Repair (MTTR) adalah waktu rata-rata yang diperlukan untuk mengembalikan fungsi suatu komponen atau sistem setelah mengalami kegagalan. Waktu perbaikan ini bersifat tidak tetap atau acak (*random*), karena dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti kondisi kerusakan, situasi operasional, serta metode perbaikan yang digunakan, sehingga durasinya bisa berbeda pada setiap kejadian (Syarifuddin, 2022). Berikut ini merupakan rumus yang digunakan untuk menghitung MTTR:

1. Distribusi Eksponensial

$$MTTR = \frac{1}{\lambda} \quad (2, 12)$$

2. Distribusi Normal

$$MTTR = \mu \quad (2, 13)$$

3. Distribusi Lognormal

$$MTTR = t_{med} e^{\frac{s^2}{2}} \quad (2, 14)$$

4. Distribusi Weibull

$$MTTR = \theta \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \quad (2.15)$$

2.2.14 Age Replacement

Metode *age replacement* merupakan sistem perawatan yang didasarkan pada umur pemakaian suatu komponen. Prinsip utamanya adalah melakukan pergantian sebelum komponen mengalami kerusakan total, sehingga pergantian yang terlalu cepat maupun terlalu lambat dapat dihindari. Dalam metode ini terdapat dua siklus, yaitu siklus pencegahan, di mana komponen diganti setelah mencapai umur tertentu, dan siklus kerusakan, di mana pergantian dilakukan ketika komponen rusak sebelum mencapai umur pergantian. Metode *age replacement* memungkinkan penjadwalan pergantian yang lebih terencana untuk mengurangi risiko kegagalan tak terduga sekaligus mengoptimalkan umur pakai komponen (Fitriani, 2021). Apabila komponen rusak sebelum mencapai usia pergantian yang direncanakan, maka pergantian dilakukan saat mencapai usia optimalnya. Usia optimal ini dihitung dengan mempertimbangkan riwayat pergantian sebelumnya agar biaya pemeliharaan dan downtime dapat ditekan serendah mungkin. Perhitungan probabilitas downtime pada usia pergantian tp dinyatakan dalam rumus: Rumus perhitungan *age replacement* adalah sebagai berikut:

$$D(tp) = \frac{\{TpR(tp) + Tf(1 - R(tp))\}}{\{(tp + Tp)R(tp) + M(tp) + Tf[1 - R(tp)]\}} \quad (2.16)$$

Dengan keterangan sebagai berikut:

$D(tp)$ = Probabilitas *downtime* pada waktu tp .

tp = Waktu operasi sejak sistem mulai beroperasi.

Tp = *Mean Time To Repair* (MTTR).

Tf = *Mean Time To Failure* (MTTF).

$R(tp)$ = Fungsi keandalan pada waktu tp .

$M(tp)$ = Fungsi pemeliharaan pada waktu tp .

2.2.15 Perhitungan Interval Waktu Pemeliharaan

Interval waktu yang tepat untuk pemeliharaan kemudian akan ditentukan berdasarkan data historis pemeliharaan (Nababan, 2023). Berikut merupakan rumus interval waktu pemeliharaan, antara lain:

1. Waktu rata – rata perbaikan

$$Tf = \frac{1}{\mu} \quad (2.17)$$

Dimana:

Tf : Waktu rata-rata perbaikan.

μ : Tingkat kecepatan perbaikan.

2. Waktu rata – rata pemeriksaan

$$Ti = \frac{1}{i} \quad (2.18)$$

Dimana:

Ti : Waktu rata-rata antara dua pemeriksaan.

i : Frekuensi pemeriksaan (*inspection frequency*).

3. Rata – rata kerusakan

$$K = \frac{\text{Frekuensi jumlah kerusakan}}{\text{Periode terjadinya kerusakan}} \quad (2.19)$$

Dimana:

K : Tingkat kerusakan

4. Frekuensi pemeriksaan optimal

$$n = \sqrt{\frac{k \cdot i}{\mu}} \quad (2.20)$$

Dimana:

n : Frekuensi optimal untuk pemeriksaan.

k : Rata-rata kerusakan (*failure rate*).

i : Frekuensi pemeriksaan (*inspection frequency*).

μ : Tingkat kecepatan perbaikan (*repair rate*).

2.2.16 Life Cycle Cost (LCC)

Life Cycle Cost (LCC) adalah metode analisis biaya yang memperhitungkan seluruh biaya yang timbul selama umur suatu aset, mulai dari tahap perencanaan, pembangunan, operasi, pemeliharaan, hingga penggantian komponen. Pendekatan ini tidak hanya melihat biaya awal (*initial cost*), tetapi juga mencakup biaya pemeliharaan, perbaikan, dan penggantian. Tujuan utama *Life Cycle Cost* (LCC) adalah mendukung pengambilan keputusan yang efisien dalam jangka panjang dengan membandingkan alternatif material, desain, maupun strategi pemeliharaan (Diputera, 2023).

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Pengumpulan Data

Metode pengumpulan data adalah proses pengumpulan data yang secara langsung berkaitan dengan permasalahan yang sedang diteliti. Data yang diperoleh memiliki peran yang penting dalam penelitian berjalan baik dan lancar. Berdasarkan sumber pengumpulannya, data penelitian terbagi menjadi dua jenis utama:

3.1.1 Data Primer

Data primer adalah informasi yang dikumpulkan secara langsung oleh peneliti untuk tujuan penelitian tertentu. Metode pengumpulan data primer meliputi survei, wawancara, eksperimen, atau observasi langsung, sehingga data ini dianggap otoritatif dan orisinal (Sinaga, 2020). Berikut ini merupakan metode yang digunakan untuk memperoleh data primer:

a. Wawancara

Wawancara merupakan teknik pengumpulan data yang dilakukan dengan melalui interaksi dengan *expert* dan operator untuk mendapatkan informasi mengenai praktik, teknik, dan tantangan yang dihadapi dalam pemeliharaan *elbow condenser*.

b. Observasi

Observasi dilakukan secara langsung untuk mengamati proses produksi menggunakan mesin tersebut dan mengetahui kondisi mesin, komponen mesin, dan cara pemeliharaan secara langsung.

3.1.2 Data Sekunder

Data sekunder merupakan data yang dikumpulkan dari berbagai sumber seperti kajian literatur, dokumen perusahaan yang berhubungan dengan penelitian. Data tersebut digunakan untuk mendukung analisis prediktif menggunakan metode *Reliability Centered Maintenance* (RCM) dan *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA). Data yang dibutuhkan yaitu:

a. Data peralatan/komponen.

- b. Data analisa kerusakan yang terjadi pada mesin.
- c. Data historis kerusakan pada mesin
- d. Data waktu perbaikan mesin.

3.2 Objek Penelitian

Objek penelitian merupakan fokus dalam suatu studi ilmiah yang memengaruhi proses pengumpulan data, analisis, hingga penarikan kesimpulan (Daniel & Harland, 2017). Pada studi ini, objek yang diteliti adalah analisis pemeliharaan pada *elbow condenser*, unit 3A PLTU XYZ. Fokus kajiannya terletak pada analisis prediktif menggunakan metode *Reliability Centered Maintenance* (RCM) & *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) dan ditambahkan dengan perhitungan *Mean Time to Failure* (MTTF) dan *Mean Time to Repair* (MTTR) guna memprediksi waktu harus melakukan pemeliharaan.

3.3 Pengolahan Data

Data yang telah diperoleh akan diproses menggunakan dua metode yaitu *Reliability Centered Maintenance* (RCM) dan *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA). Metode ini digunakan untuk menganalisis kerusakan dan pemeliharaan yang cocok pada *elbow condenser*.

1. Metode *Reliability Centered Maintenance* (RCM)

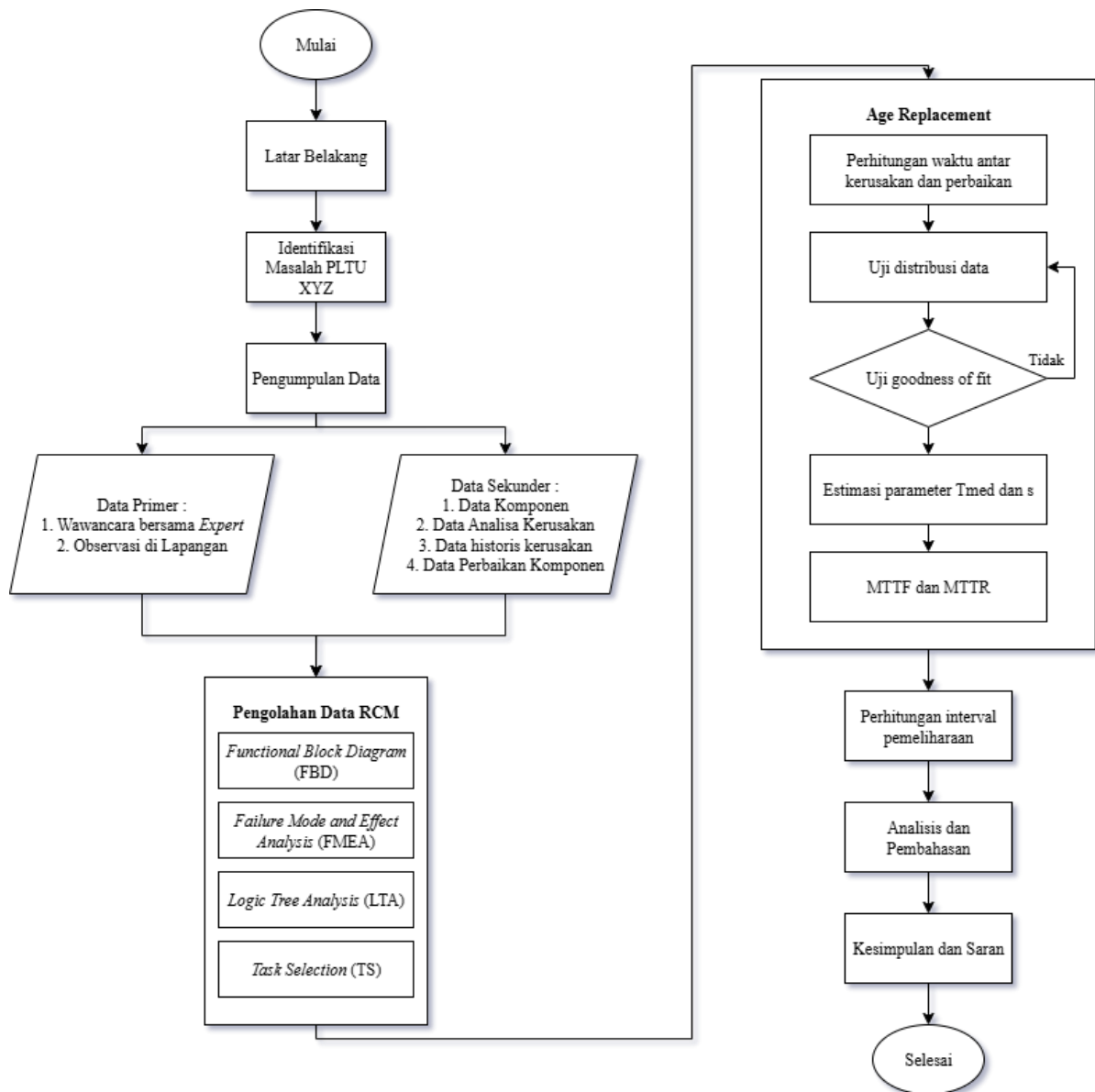
Reliability Centered Maintenance (RCM) merupakan pendekatan analisis yang bertujuan untuk menentukan jenis pemeliharaan yang paling tepat guna menjaga performa sistem atau peralatan agar tetap optimal dan berfungsi sebagaimana mestinya (Wicaksono, 2024). Metode RCM memiliki 4 tahapan yaitu, mendeskripsikan sistem dengan *Functional Block Diagram* (FBD), analisis *Failure Mode & Effect Analysis* (FMEA), analisis *Logic Tree Analysis* (LTA), dan analisis *Task Selection* (TS).

2. Metode *Age Replacement* (AR)

Age Replacement merupakan metode pergantian komponen berdasarkan umur pakai, di mana interval pergantiannya ditetapkan sesuai dengan usia pemakaian komponen tersebut. Tujuan dari pendekatan ini adalah menentukan usia optimal (tp) untuk pelaksanaan pergantian preventif guna meminimalkan total waktu henti (*downtime*) per satuan waktu (Fitriani, 2021).

3.4 Alur Penelitian

Berikut merupakan alur dari penelitian diuraikan pada Gambar 3.1.



Gambar 3. 1 Alur Penelitian

Berikut adalah penjelasan alur penelitian berdasarkan diagram alir:

1. Mulai
2. Latar Belakang.

Menjelaskan dasar dan urgensi dari penelitian, seperti perlunya usulan pemeliharaan terhadap kerusakan yang dialami *elbow condenser* PLTU XYZ.

3. Identifikasi Masalah

Menentukan dan merumuskan masalah utama yang akan dianalisis secara lebih mendalam, sebagai dasar untuk tahap-tahap berikutnya.

4. Pengumpulan Data

Data dikumpulkan melalui dua sumber utama, yaitu data primer dan sekunder. Data primer diperoleh dari wawancara dengan ahli dan observasi langsung di lapangan. Sedangkan data sekunder mencakup informasi teknis komponen, hasil analisis kerusakan sebelumnya, data historis kerusakan, dan catatan perbaikan

5. Pengolahan Data RCM

Reliability Centered Maintenance (RCM) untuk menentukan strategi pemeliharaan yang sesuai berdasarkan fungsi dan potensi kegagalan. Berikut merupakan tahapan RCM:

- Mendeskripsikan dan menggambarkan fungsi sistem dengan *Functional Block Diagram* (FBD).
- Mengidentifikasi mode kegagalan dengan metode *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA)
- Mengklasifikasikan jenis kerusakan dengan metode *Logic Tree Analysis* (LTA)
- Menentukan strategi perawatan yang tepat *Task Selection* (TS).

6. Pengolahan Data *Age Replacement*

Age Replacement merupakan metode pergantian komponen berdasarkan umur pakai, di mana interval pergantian atau pemeliharaan ditetapkan sesuai usia pemakaian komponen tersebut. Berikut tahapan pada metode *Age Replacement*:

- Menghitung waktu antar kerusakan & perbaikan.
- Melakukan uji distribusi data, yaitu perhitungan *index of fit* & uji *goodness of fit*.
- Mengestimasi parameter (T_{med} dan s).
- Menhitung nilai MTTF & MTTR

7. Perhitungan Interval *Maintenance*

Menghitung interval ideal pelaksanaan pemeliharaan berdasarkan:

- *Mean Time to Failure* (MTTF) : Rata-rata waktu sebelum terjadi kerusakan.
- *Mean Time to Repair* (MTTR): Rata-rata waktu yang dibutuhkan untuk memperbaiki kerusakan.

8. Analisis dan Pembahasan

Menganalisis hasil pengolahan data terutama pada hasil perhitungan dan juga hasil wawancara yang sudah dilakukan. Pada tahap ini, dilakukan juga tahap validasi solusi yang mengacu pada aspek ketahanan dan *life cycle cost* komponen.

9. Kesimpulan dan Saran

Menyusun simpulan dari hasil analisis serta memberikan saran strategis terkait peningkatan efektivitas sistem pemeliharaan dan pengurangan frekuensi kerusakan.

10. Selesai

BAB IV

PENGUMPULAN DAN PENGOLAHAN DATA

4.1 Pengumpulan Data

4.1.1 Data Waktu Pemeliharaan Komponen *elbow condenser*

Tabel 4.1 berikut merupakan data historis waktu pemeliharaan dan kerusakan komponen *elbow condenser*:

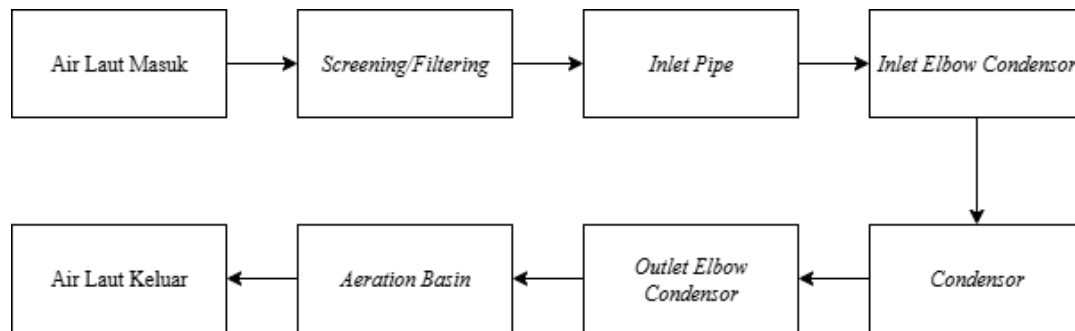
Tabel 4. 1 Data Waktu Kerusakan Komponen

Instalasi Komponen					
Start	09/11/2019				
Data Historis Pemeliharaann					
Komponen	No	Start	Finish	TTF (day)	TTR (day)
Elbow Condenser	1	28/11/2022	29/11/2022	-	1
	2	02/02/2023	02/02/2023	65	1
	3	28/02/2023	03/03/2023	26	3
	4	23/08/2023	28/08/2023	173	5
	5	26/09/2023	02/10/2023	29	6
	6	26/01/2024	05/03/2024	116	39
	7	15/06/2024	12/09/2024	102	89

4.2 Pengolahan Data Penentuan Komponen Kritis

4.2.1 *Functional Block Diagram (FBD)*

Functional Block Diagram (FBD) merupakan diagram yang merepresentasikan fungsi pada proses dalam bentuk visual dari fungsi-fungsi utama suatu sistem dalam bentuk blok-blok yang saling terhubung. Gambar 4.1 dibawah merupakan FBD dari proses masuk dan keluarnya air laut untuk tahap kondensasi uap panas yang melibatkan *elbow condenser*:

Gambar 4. 1 *Functional Block Diagram (FBD)*

4.2.2 Failure Mode Effect and Analysis (FMEA)

FMEA bertujuan untuk mengidentifikasi kemungkinan kegagalan mesin dan menganalisis dampaknya terhadap produksi, kualitas produk, dan keselamatan kerja. Dengan menilai risiko berdasarkan frekuensi dan tingkat keparahan masing-masing mode kegagalan, FMEA juga digunakan untuk mencari nilai *Risk Priority Number* (RPN) untuk memprioritaskan tindakan pemeliharaan dan perbaikan. Dengan cara ini, fokus dapat diarahkan pada masalah yang paling kritis untuk meningkatkan keandalan mesin dan efisiensi operasional. Tabel 4,2 ini merupakan tabel FMEA mengenai komponen *elbow condenser*:

Tabel 4. 2 Penilaian FMEA

No	Nama Komponen	Mode Kegagalan	Efek Kegagalan	Penyebab Kegagalan	S	O	D	RPN
1.	<i>Elbow Pipe Condensor</i>	Korosi	Kebocoran Air Laut	<i>Water Quality (chroint)</i>	3	3	3	27
				<i>Improper maintenance</i>	4	3	4	48
				<i>Aging</i>	5	4	5	100
				<i>Coating Damage</i>	8	5	6	240

				<i>Foreign Material</i>	4	6	2	48
				<i>Improper material</i>	9	6	5	270
		<i>Cracking</i>	Kebocoran Air Laut	<i>Foreign Material</i>	7	5	4	140
				<i>Improper Maintenance</i>	7	5	5	175
				<i>Aging</i>	6	5	4	120
				<i>Improper material</i>	9	6	5	270

Berdasarkan dari tabel *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) tersebut didapatkan penjelasan sebagai berikut:

1. Komponen yang mengalami kerusakan adalah *elbow condenser*
2. Mode kegagalan pada komponen *elbow condenser* tersebut adalah korosi, dan terjadi *cracking*.
3. Penyebab kegagalan komponen *elbow condenser* pada kasus terjadinya korosi adalah kualitas air bermasalah, pemeliharaan tidak sesuai, usia komponen, kerusakan pada *coating*, material asing didalam komponen, dan material komponen yang tidak sesuai.
4. Penyebab kegagalan komponen *elbow condenser* pada kasus terjadinya *cracking* adalah pemeliharaan tidak sesuai, usia komponen, material asing didalam komponen, dan material komponen yang tidak sesuai.
5. Nilai *Risk Priority Number* (RPN) paling tinggi yaitu 270 pada kerusakan korosi dan *cracking* yang disebabkan oleh material yang tidak sesuai.

Setelah melakukan perhitungan nilai RPN, selanjutnya adalah mengidentifikasi tingkat kritis komponen. Penentuan nilai kritis memiliki tujuan untuk mengidentifikasi tingkat kritis dari komponen. Berikut adalah data perhitungan nilai kritis dari komponen *elbow condenser*:

$$\text{Nilai} = \frac{\text{Total Nilai RPN}}{\text{Jumlah Failure Mode}} = \frac{1438}{10} = 143,8$$

Berdasarkan nilai tersebut yang disesuaikan dengan tabel *critically analysis*, *elbow condenser* termasuk komponen yang memiliki tingkat kritis pada klasifikasi 61-181 yang tergolong pada tingkat tinggi (*high*) dan resiko dan bahaya yang di timbulkan masi bisa bisa di toleransi (*tolerable*).

4.2.3 Logic Tree Analysis (LTA)

Logic Tree Analysis adalah *tools* untuk menganalisis penyebab kegagalan dalam suatu sistem atau peralatan, dengan tujuan untuk menentukan tindakan pemeliharaan yang paling efektif. Tabel 4.3 ini merupakan tabel *Logic Tree Analysis* (LTA) mengenai komponen pada *elbow condenser*.

Tabel 4. 3 *Logic Tree Analysis* (LTA)

<i>Equipment</i>	<i>Failure Mode</i>	<i>Penyebab Kegagalan</i>	<i>Critical Analysis</i>			<i>Category</i>
			<i>Evident</i>	<i>Safety</i>	<i>Outage</i>	
<i>Elbow Condenser</i>	Korosi	<i>Water Quality (chlorint)</i>	Y	N	Y	D/B
		<i>Improper maintenance</i>	Y	Y	Y	D/B
		<i>Aging</i>	N	N	Y	B
		<i>Coating Damage</i>	N	N	Y	D/B
		<i>Foreign Material</i>	Y	N	Y	B
		<i>Improper material</i>	Y	Y	Y	D/B
	Cracking (retak)	<i>Foreign Material</i>	Y	N	Y	B
		<i>Improper Maintenance</i>	Y	Y	Y	D/B

		<i>Aging</i>	N	N	Y	B
		<i>Improper material</i>	Y	Y	Y	D/B

Berikut merupakan contoh analisis mode kegagalan pada penyebab kegagalan *improper material* sesuai dengan *Logic Tree Analysis* (LTA):

- *Evident*, (Apakah operator mengetahui telah terjadi adanya kegagalan pada sistem pada saat berada di kondisi normal?) **YES**
- *Safety*, (Apakah pada kerusakan tersebut dapat menimbulkan risiko kecelakaan?) **YES**
- *Outage*, (Apakah pada kerusakan dapat menyebabkan sebagian sistem / keseluruhan sistem berhenti?) **YES**

Kategori B/D (*outage problem/hidden failure*) karena *failure mode* pada komponen *elbow condenser* berdampak pada seluruh atau sebagian komponen lain yang beroperasi pabrik dan apabila tidak diselesaikan dapat memicu kegagalan lainnya

4.2.4 Task Selection (TS)

Task Selection merupakan proses pemilihan tindakan pemeliharaan berdasarkan analisis terhadap kegagalan pada sebuah komponen atau peralatan, dengan tujuan untuk menjaga keandalan dan meningkatkan efisiensi operasional sistem. Tabel 4.4 dibawah merupakan *task selection* mengenai komponen *elbow condenser*:

Tabel 4. 4 Task Selection (TS)

No	Equipment	Failure Mode	Penyebab Kegagalan	Category							Selection Task
				1	2	3	4	5	6	7	
1.	Elbow Condenser	Korosi	Water Quality (chlorint)	N	N	Y	Y	N	Y	N	CD
			Improper maintenanc e	N	N	Y	Y	Y	Y	N	CD
			Aging	Y	Y	Y	Y	N	Y	N	TD

			<i>Coating Damage</i>	N	N	Y	Y	Y	Y	N	FF
			<i>Foreign Material</i>	N	N	Y	Y	N	Y	N	CD
			<i>Improper material</i>	Y	Y	Y	Y	Y	N	Y	-
		<i>Cracking (retak)</i>	<i>Foreign Material</i>	N	N	Y	Y	N	Y	N	CD
			<i>Improper Maintenance</i>	N	N	Y	Y	Y	Y	N	CD
			<i>Aging</i>	Y	Y	Y	Y	N	Y	N	TD
			<i>Improper material</i>	Y	Y	Y	Y	Y	N	Y	-

Berikut adalah pertanyaan terkait *task selection* untuk kegagalan pada salah satu komponen *elbow condenser*, yaitu *improper maintenance*:

- Apakah hubungan kerusakan dengan umur reliabilitas diketahui?
- Apakah TD Task dapat digunakan? **YES**
- Apakah CD Task dapat digunakan? **YES**
- Apakah termasuk dalam mode kerusakan? **YES**
- Apakah FF Task dapat digunakan? **YES**
- Apakah di antara tindakan yang dipilih efektif? **NO**
- Dapatkah sebuah desain modifikasi dirancang untuk mengeliminasi mode kegagalan serta efeknya? **YES**

Selection Task: -

4.3 Pengolahan Data Penentuan Interval Pemeriksaan dan Pergantian Komponen

4.3.1 Penentuan Distribusi Data Antar Waktu Kerusakan (*Time to Failure*)

Setelah melakukan analisis kerusakan pada *elbow condenser* tahap selanjutnya adalah menentukan jarak antar kerusakan pada komponen dan menentukan distribusi antar waktu kerusakan berdasarkan nilai *Index of Fit* dengan perhitungan distribusi eksponensial, normal, *lognormal*, dan *weibull*. Tabel 4.7 menampilkan data *Time to Failure* yang digunakan untuk pengujian distribusi data.

Tabel 4. 5 *Time to Failure* Komponen *Elbow Condenser*

No	Start	Finish	TTF (day)
1	28/11/2022	29/11/2022	-
2	02/02/2023	02/02/2023	65
3	28/02/2023	03/03/2023	26
4	23/08/2023	28/08/2023	173
5	26/09/2023	02/10/2023	29
6	26/01/2024	05/03/2024	116
7	15/06/2024	12/09/2024	102

Berikut ini merupakan perhitungan distribusi menggunakan data antar waktu kerusakan:

1. Distribusi Eksponensial

Berikut ini merupakan perhitungan distribusi eksponensial:

$$\begin{aligned}
 X_i &= t_i \\
 &= 26 \\
 x_i^2 &= 26^2 \\
 &= 676 \\
 F(t_i) &= \frac{(i-0,3)}{(n+0,4)} \\
 &= \frac{(1-0,3)}{(6+0,4)} = 0,109 \\
 Y_i &= \ln \left[\left(\frac{1}{1-F(t_i)} \right) \right]
 \end{aligned}$$

$$= \ln \left[\left(\frac{1}{1-0,109} \right) \right] = 0,116$$

$$Y_i^2 = 0,116^2$$

$$= 0,013$$

$$X_i Y_i = 26 * 0,116$$

$$= 3,012$$

Berikut ini merupakan perhitungan nilai r pada distribusi eksponensial:

$$\begin{aligned} r \text{ (Index of Fit)} &= \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - (\sum_{i=1}^n x_i)(\sum_{i=1}^n y_i)}{\sqrt{[n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2][n \sum_{i=1}^n y_i^2 - (\sum_{i=1}^n y_i)^2]}} \\ &= \frac{(6 * (672,235)) - ((511 * 5,374))}{\sqrt{((6 * 59531) - (511)^2) * ((6 * 7,808) - (5,374)^2)}} \\ &= 0,969 \end{aligned}$$

Tabel 4. 6 *Time to Failure* Distribusi Eksponensial

Distribusi Eksponensial							
No	ti	Xi= ti	Xi2	F(ti)	Yi	Yi2	XiYi
1	26	26	676	0,109	0,116	0,013	3,012
2	29	29	841	0,266	0,309	0,095	8,953
3	65	65	4225	0,422	0,548	0,300	35,618
4	102	102	10404	0,578	0,863	0,745	88,031
5	116	116	13456	0,734	1,326	1,757	153,778
6	173	173	29929	0,891	2,213	4,897	382,844
Total	511	511	59531	3	5,374	7,808	672,235
IOF = r =		0,969					

2. Distribusi Normal

Berikut ini merupakan perhitungan distribusi normal :

$$X_i = t_i$$

$$= 26$$

$$x_i^2 = 26^2$$

$$= 676$$

$$\begin{aligned}
F(t_i) &= \frac{(i-0,3)}{(n+0,4)} \\
&= \frac{(1-0,3)}{(6+0,4)} = 0,109 \\
Y_i &= z_i = \Phi^{-1}[F(t_i)] \\
&= z_i = \Phi^{-1}[(0,109)] = -1,230 \\
Y_i^2 &= -1,230^2 \\
&= 1,513 \\
X_i Y_i &= 26 * (-1,230) \\
&= -31,976
\end{aligned}$$

Berikut ini merupakan perhitungan nilai r pada distribusi eksponensial:

$$\begin{aligned}
r \text{ (Index of Fit)} &= \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - (\sum_{i=1}^n x_i)(\sum_{i=1}^n y_i)}{\sqrt{[n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2][n \sum_{i=1}^n y_i^2 - (\sum_{i=1}^n y_i)^2]}} \\
&= \frac{(6 * (242,553)) - ((511 * (0)))}{\sqrt{((6 * 59531) - (511)^2) * ((6 * 3,887) - (0)^2)}} \\
&= 0,972
\end{aligned}$$

Tabel 4. 7 Time to Failure Distribusi Normal

Distribusi Normal							
No	ti	Xi= ti	Xi2	F(ti)	Yi	Yi2	XiYi
1	26	26	676	0,109	-1,230	1,513	-31,976
2	29	29	841	0,266	-0,626	0,392	-18,157
3	65	65	4225	0,422	-0,197	0,039	-12,811
4	102	102	10404	0,578	0,197	0,039	20,104
5	116	116	13456	0,734	0,626	0,392	72,627
6	173	173	29929	0,891	1,230	1,513	212,766
Total	511	511	59531	3	0	3,887	242,553
IOF = r =		0,972					

3. Distribusi Lognormal

Berikut ini merupakan perhitungan distribusi lognormal:

$$X_i = \ln t_i$$

$$\begin{aligned}
 &= \ln(26) = 3,258 \\
 x_i^2 &= 3,258^2 \\
 &= 10,615 \\
 F(t_i) &= \frac{(i-0,3)}{(n+0,4)} \\
 &= \frac{(1-0,3)}{(6+0,4)} = 0,109 \\
 Y_i &= z_i = \Phi^{-1}[F(t_i)] \\
 &= z_i = \Phi^{-1}[(0,109)] = -1,230 \\
 Y_i^2 &= -1,230^2 \\
 &= 1,513 \\
 X_i Y_i &= 26 * (-1,230) \\
 &= -4,007
 \end{aligned}$$

Berikut ini merupakan perhitungan nilai r pada distribusi lognormal:

$$\begin{aligned}
 r \text{ (Index of Fit)} &= \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - (\sum_{i=1}^n x_i)(\sum_{i=1}^n y_i)}{\sqrt{[n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2][n \sum_{i=1}^n y_i^2 - (\sum_{i=1}^n y_i)^2]}} \\
 &= \frac{(6 * (3,228)) - ((25,332 * (0)))}{\sqrt{((6 * 109,923) - (25,332)^2) * ((6 * 3,887) - (0)^2)}} \\
 &= 0,967
 \end{aligned}$$

Tabel 4. 8 Time to Failure Distribusi Lognormal

Distribusi Lognormal							
No	ti	Xi=ln ti	Xi2	F(ti)	Yi	Yi2	XiYi
1	26	3,258	10,615	0,109	-1,230	1,513	-4,007
2	29	3,367	11,339	0,266	-0,626	0,392	-2,108
3	65	4,174	17,426	0,422	-0,197	0,039	-0,823
4	102	4,625	21,390	0,578	0,197	0,039	0,912
5	116	4,754	22,597	0,734	0,626	0,392	2,976
6	173	5,153	26,556	0,891	1,230	1,513	6,338
Total	511	25,332	109,923	3	0	3,887	3,288

IOF = r =	0,967
----------------------------	--------------

4. Distribusi *Weibull*

Berikut ini merupakan perhitungan distribusi *weibull*:

$$\begin{aligned}
 X_i &= \ln t_i \\
 &= \ln (26) = 3,258 \\
 x_i^2 &= 3,258^2 \\
 &= 10,615 \\
 F(t_i) &= \frac{(i-0,3)}{(n+0,4)} \\
 &= \frac{(1-0,3)}{(6+0,4)} = 0,109 \\
 Y_i &= \ln \left[\ln \left(\frac{1}{1-F(t_i)} \right) \right] \\
 &= \ln \left[\ln \left(\frac{1}{1-0,109} \right) \right] = -2,156 \\
 Y_i^2 &= -2,156^2 \\
 &= 4,647 \\
 X_i Y_i &= 3,258 * (-2,156) \\
 &= -7,023
 \end{aligned}$$

Berikut ini merupakan perhitungan nilai r pada distribusi *weibull*:

$$\begin{aligned}
 r \text{ (Index of Fit)} &= \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - (\sum_{i=1}^n x_i)(\sum_{i=1}^n y_i)}{\sqrt{[n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2][n \sum_{i=1}^n y_i^2 - (\sum_{i=1}^n y_i)^2]}} \\
 &= \frac{(6 * (-8,739)) - ((25,332 * (-3,003)))}{\sqrt{((6 * 109,923) - (25,332)^2) * ((6 * 7,122) - (-3,003)^2)}} \\
 &= 0,964
 \end{aligned}$$

Tabel 4. 9 *Time to Failure* Distribusi *Weibull*

Distribusi <i>Weibull</i>							
No	ti	Xi=ln ti	Xi2	F(ti)	Yi	Yi2	XiYi
1	26	3,258	10,615	0,109	-2,156	4,647	-7,023

2	29	3,367	11,339	0,266	-1,175	1,381	-3,957
3	65	4,174	17,426	0,422	-0,602	0,362	-2,511
4	102	4,625	21,390	0,578	-0,147	0,022	-0,681
5	116	4,754	22,597	0,734	0,282	0,079	1,340
6	173	5,153	26,556	0,891	0,794	0,631	4,093
Total	511	25,332	109,923	3	-3,003	7,122	-8,739
IOF = r =	0,964						

Berikut ini merupakan hasil perhitungan *Index of Fit* pada distribusi eksponensial, normal, lognormal, dan *weibull*:

Tabel 4. 10 *Index of Fit Time to Failure*

Distribusi	Index Of Fit
Ekspensial	0,969
Normal	0,972
Lognormal	0,967
<i>Weibull</i>	0,964
Distribusi	Index Of Fit
Ekspensial	96,95%
Normal	97,23%
Lognormal	96,69%
<i>Weibull</i>	96,41%

Berdasarkan hasil perhitungan *Index of Fit* dapat diketahui bahwa distribusi normal mendapat nilai *Index of Fit* yaitu 97,23%o leh karena itu pengolahan data *Time to Failure* selanjutnya menggunakan distribusi normal.

4.3.2 Penentuan Distribusi Data Antar Waktu Perbaikan (*Time to Repair*)

Setelah melakukan perhitungan distribusi data antar waktu kerusakan, tahap selanjutnya adalah melakukan perhitungan interval waktu antara perbaikan komponen *elbow condenser*.

Tabel 4. 11 *Time to Repair* Komponen *Elbow Condenser*

No	Start	Finish	TTR (day)
1	28/11/2022	29/11/2022	1
2	02/02/2023	02/02/2023	1
3	28/02/2023	03/03/2023	3
4	23/08/2023	28/08/2023	5
5	26/09/2023	02/10/2023	6
6	26/01/2024	05/03/2024	39
7	15/06/2024	12/09/2024	89

Berikut ini merupakan perhitungan distribusi untuk menentukan nilai *Index of Fit* terbesar dari distribusi eksponensial, normal, lognormal, dan *weibull*:

1. Distribusi Eksponensial

Berikut ini merupakan perhitungan distribusi eksponensial:

$$X_i = dt_i$$

$$= 1$$

$$x_i^2 = 1^2$$

$$= 1$$

$$F(dti) = \frac{(i-0,3)}{(n+0,4)}$$

$$= \frac{(1-0,3)}{(7+0,4)} = 0,095$$

$$Y_i = \ln \left[\left(\frac{1}{1-F(dti)} \right) \right]$$

$$= \ln \left[\left(\frac{1}{1-0,095} \right) \right] = 0,099$$

$$Y_i^2 = 0,099^2$$

$$= 0,010$$

$$X_i Y_i = 1 * 0,099$$

$$= 0,099$$

Berikut ini merupakan perhitungan nilai r pada distribusi eksponensial:

$$\begin{aligned}
 r \text{ (Index of Fit)} &= \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - (\sum_{i=1}^n x_i)(\sum_{i=1}^n y_i)}{\sqrt{[n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2][n \sum_{i=1}^n y_i^2 - (\sum_{i=1}^n y_i)^2]}} \\
 &= \frac{(7*(278,476)) - ((144*(6,345)))}{\sqrt{((7*9514) - (144)^2)*((7*9,505) - (6,345)^2)}} \\
 &= 0,943
 \end{aligned}$$

Tabel 4. 12 *Time to Repair* Distribusi Eksponensial

Distribusi Eksponensial							
No	ti	Xi= dti	Xi2	F(dti)	Yi	Yi2	XiYi
1	1	1	1	0,095	0,099	0,010	0,099
2	1	1	1	0,230	0,261	0,068	0,261
3	3	3	9	0,365	0,454	0,206	1,362
4	5	5	25	0,500	0,693	0,480	3,466
5	6	6	36	0,635	1,008	1,017	6,049
6	39	39	1521	0,770	1,471	2,163	57,363
7	89	89	7921	0,905	2,358	5,561	209,876
Total	144	144	9514	3,500	6,345	9,505	278,476
IOF = r =		0,943					

2. Distribusi Normal

$$\begin{aligned}
 X_i &= dt_i \\
 &= 1
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 x_i^2 &= 1^2 \\
 &= 1
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 F(dti) &= \frac{(i-0,3)}{(n+0,4)} \\
 &= \frac{(1-0,3)}{(7+0,4)} = 0,095
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Y_i &= z_i = \Phi^{-1}[F(dti)] \\
 &= z_i = \Phi^{-1}[F(0,095)] = -1,313
 \end{aligned}$$

$$Y_i^2 = -1,313^2$$

$$= 1,724$$

$$X_i Y_i = 1 * (-1,313)$$

$$= -1,313$$

Berikut ini merupakan perhitungan nilai r pada distribusi normal:

$$\begin{aligned} r \text{ (Index of Fit)} &= \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - (\sum_{i=1}^n x_i)(\sum_{i=1}^n y_i)}{\sqrt{[n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2][n \sum_{i=1}^n y_i^2 - (\sum_{i=1}^n y_i)^2]}} \\ &= \frac{(7 * (144,689)) - ((144 * (0)))}{\sqrt{((7 * 9514) - (144)^2) * ((7 * 4,781) - (0)^2)}} \\ &= 0,818 \end{aligned}$$

Tabel 4. 13 *Time to Repair* Distribusi Normal

Distribusi Normal							
No	dti	Xi= dti	Xi2	F(dti)	Yi	Yi2	XiYi
1	1	1	1	0,095	-1,313	1,724	-1,313
2	1	1	1	0,230	-0,740	0,547	-0,740
3	3	3	9	0,365	-0,345	0,119	-1,036
4	5	5	25	0,500	0	0	0
5	6	6	36	0,635	0,345	0,119	2,073
6	39	39	1521	0,770	0,740	0,547	28,850
7	89	89	7921	0,905	1,313	1,724	116,855
Total	144	144	9514	3,500	0	4,781	144,689
IOF = r =	0,818						

3. Distribusi Lognormal

Berikut ini merupakan perhitungan distribusi lognormal:

$$X_i = \ln dt_i$$

$$= \ln (1) = 0$$

$$x_i^2 = 0^2$$

$$= 0$$

$$\begin{aligned}
 F(dti) &= \frac{(i-0,3)}{(n+0,4)} \\
 &= \frac{(1-0,3)}{(7+0,4)} = 0,095 \\
 Y_i &= z_i = \Phi^{-1}[F(dti)] \\
 &= z_i = \Phi^{-1}[F(0,095)] = -1,313 \\
 Y_i^2 &= -1,313^2 \\
 &= 1,724 \\
 X_i Y_i &= 0 * (-1,313) \\
 &= 0
 \end{aligned}$$

Berikut ini merupakan perhitungan nilai r pada distribusi lognormal:

$$\begin{aligned}
 r \text{ (Index of Fit)} &= \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - (\sum_{i=1}^n x_i)(\sum_{i=1}^n y_i)}{\sqrt{[n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2][n \sum_{i=1}^n y_i^2 - (\sum_{i=1}^n y_i)^2]}} \\
 &= \frac{(7 * (8,843)) - ((12,652 * (0)))}{\sqrt{((7 * 40,577) - (12,652)^2) * ((7 * 4,781) - (0)^2)}} \\
 &= 0,961
 \end{aligned}$$

Tabel 4. 14 *Time to Repair* Distribusi Lognormal

Distribusi Lognormal							
No	dti	Xi=ln dti	Xi2	F(dti)	Yi	Yi2	XiYi
1	1	0	0	0,095	-1,313	1,724	0
2	1	0	0	0,230	-0,740	0,547	0
3	3	1,099	1,207	0,365	-0,345	0,119	-0,380
4	5	1,609	2,590	0,500	0	0	0
5	6	1,792	3,210	0,635	0,345	0,119	0,619
6	39	3,664	13,422	0,770	0,740	0,547	2,710
7	89	4,489	20,148	0,905	1,313	1,724	5,893
Total	144	12,652	40,577	3,500	0	4,781	8,843
IOF = r =		0,961					

4. Distribusi Weibull

Berikut ini merupakan perhitungan distribusi *weibull*:

$$\begin{aligned}
 X_i &= \ln dt_i \\
 &= \ln (1) = 0 \\
 x_i^2 &= 0^2 \\
 &= 0 \\
 F(dti) &= \frac{(i-0,3)}{(n+0,4)} \\
 &= \frac{(1-0,3)}{(7+0,4)} = 0,095 \\
 Y_i &= \ln \left[\ln \left(\frac{1}{1-F(dti)} \right) \right] \\
 &= \ln \left[\ln \left(\frac{1}{1-0,095} \right) \right] = -2,309 \\
 Y_i^2 &= -2,309^2 \\
 &= 5,331 \\
 X_i Y_i &= 0 * (-2,309) \\
 &= 0
 \end{aligned}$$

Berikut ini merupakan perhitungan nilai r pada distribusi *weibull*:

$$\begin{aligned}
 r \text{ (Index of Fit)} &= \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - (\sum_{i=1}^n x_i)(\sum_{i=1}^n y_i)}{\sqrt{[n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2][n \sum_{i=1}^n y_i^2 - (\sum_{i=1}^n y_i)^2]}} \\
 &= \frac{(7*(3,821)) - ((12,652)*(-3,556))}{\sqrt{((7*40,577) - (12,652)^2) * ((7*8,778) - (-3,556)^2)}} \\
 &= 0,922
 \end{aligned}$$

Tabel 4. 15 *Time to Repair* Distribusi *Weibull*

Distribusi Weibull							
No	dti	Xi=ln dti	Xi2	F(dti)	Yi	Yi2	XiYi
1	1	0	0	0,095	-2,309	5,331	0
2	1	0	0	0,230	-1,343	1,804	0
3	3	1,099	1,207	0,365	-0,790	0,624	-0,868
4	5	1,609	2,590	0,500	-0,367	0,134	-0,590

5	6	1,792	3,210	0,635	0,008	0	0,015
6	39	3,664	13,422	0,770	0,386	0,149	1,414
7	89	4,489	20,148	0,905	0,858	0,736	3,851
Total	144	12,652	40,577	3,500	-3,556	8,778	3,821
IOF = r =	0,922						

Berikut ini merupakan hasil perhitungan *Index of Fit* pada distribusi eksponensial, normal, lognormal, dan *weibull*:

Tabel 4. 16 *Index of Fit Time to Repair*

Distribusi	Index Of Fit
Ekspensial	0,943
Normal	0,818
Lognormal	0,961
<i>Weibull</i>	0,922
Distribusi	Index Of Fit
Ekspensial	94,34%
Normal	81,75%
Lognormal	96,10%
<i>Weibull</i>	92,25%

Berdasarkan hasil perhitungan *Index of Fit* dapat diketahui bahwa distribusi lognormal mendapat nilai *Index of Fit* yaitu 98,91% oleh karena itu pengolahan data selanjutnya menggunakan distribusi lognormal.

4.3.3 Uji *Goodness of Fit* pada Data *Time to Failure*

Uji *Goodness of fit* merupakan uji yang digunakan untuk menguji hipotesis terhadap distribusi terpilih. Pada perhitungan sebelumnya distribusi yang terpilih adalah distribusi lognormal. Pengujian dilakukan menggunakan metode *Kolmogorov-Smirnov*. Berikut ini merupakan Uji *Goodness of Fit* pada distribusi data waktu antar kerusakan:

Tabel 4. 17 *Kolmogorov-Smirnov Time to Failure*

No	ln(ti)	[ln (ti) - xbar ln (ti)]2	Zti	Fti	D1	D2
1	3,258	0,929	-1,369	0,086	0,086	0,081
2	3,367	0,730	-1,214	0,112	-0,054	0,221
3	4,174	0,002	-0,068	0,473	0,140	0,027
4	4,625	0,162	0,572	0,716	0,216	-0,050
5	4,754	0,283	0,755	0,775	0,108	0,058
6	5,153	0,867	1,323	0,907	0,074	0,093
Jumlah	25,332	2,974		Dn Max	0,216	0,221

Dari hasil perhitungan dapat diketahui bahwa:

Dhitung didapatkan dari nilai terbesar D1 dan D2, dimana Dhitung = 0,221.

Hipotesa untuk melakukan Uji *Kolmogrov-Smirnov Test* adalah :

H0 : Data *Time To Failure* berdistribusi Lognormal

H1 : Data *Time To Failure* tidak berdistribusi Lognormal

α : 0,05

Dtabel : Dapat dilihat dari tabel D *Kolmogorov-Smirnov*, dengan nilai Dcrit 6 ; 0,05 = 0,519

Wilayah kritis : Dn < Dcrit maka H0 diterima. Sehingga keputusannya Dn < Dcrit, 0,221 < 0,519, yaitu H0 diterima.

4.3.4 Uji *Goodness of Fit* pada Distribusi Data *Time to Repair*

Uji *Goodness of fit* merupakan uji yang digunakan untuk menguji hipotesis terhadap distribusi terpilih. Pada perhitungan sebelumnya distribusi yang terpilih adalah distribusi lognormal. Pengujian dilakukan menggunakan metode *Kolmogorov-Smirnov*. Berikut ini merupakan Uji *Goodness of Fit* pada distribusi data waktu antar perbaikan:

Tabel 4. 18 *Kolmogorov-Smirnov Time to Repair*

No	ln(dti)	[ln (dti) - xbar ln (dti)]2	Zdti	Fdti	D1	D2
1	0	3,267	-1,136	0,128	0,128	0,015

2	0	3,267	-1,136	0,128	-0,015	0,158
3	1,099	0,502	-0,446	0,328	0,042	0,101
4	1,609	0,039	-0,124	0,450	0,022	0,121
5	1,792	0	-0,010	0,496	-0,075	0,218
6	3,664	3,445	1,167	0,878	0,164	-0,021
7	4,489	7,189	1,686	0,954	0,097	0,046
Jumlah	12,652	17,710		Dn Max	0,164	0,218

Dari hasil perhitungan dapat diketahui bahwa:

Dhitung didapatkan dari nilai terbesar D1 dan D2, dimana Dhitung = 0,218.

Hipotesa untuk melakukan Uji *Kolmogrov-Smirnov Test* adalah:

H0 : Data *Time To Repair* berdistribusi Lognormal

H1 : Data *Time To Repair* tidak berdistribusi Lognormal

α : 0,05

Dtabel : Dapat dilihat dari tabel D *Kolmogorov-Smirnov*, dengan nilai Dcrit 7 ; 0,05 = 0,483

Wilayah kritis : Dn < Dcrit maka H0 diterima. Sehingga keputusannya Dn < Dcrit, 0,218 < 0,483 sehingga H0 diterima.

4.3.5 Perhitungan Parameter Distribusi Data Waktu Kerusakan (*Time to Failure*)

Tahap selanjutnya setelah data terbukti terdistribusi adalah menghitung parameter. Parameter yang digunakan adalah Tmed (parameter lokasi) dan s (parameter bentuk). Berikut adalah perhitungan manual kedua parameter tersebut:

1. Tmed (Parameter Lokasi)

$$\begin{aligned}
 N &= 6 \\
 \mu &= \frac{\sum_{i=1}^n \ln(t_i)}{n} \\
 \mu &= \frac{25,332}{6} \\
 \mu &= 4,22194 \\
 Tmed &= e^{\mu} \\
 &= e^{4,22194}
 \end{aligned}$$

$$= 68,16553$$

2. s (Parameter bentuk)

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [\ln(ti) - \mu]^2}{n}}$$

$$s = \sqrt{\frac{2,974}{6}}$$

$$s = 0,70406$$

4.3.6 Perhitungan Parameter Distribusi Data Waktu Perbaikan (*Time to Repair*)

Parameter yang digunakan adalah Tmed (parameter lokasi) dan s (parameter bentuk). Berikut adalah perhitungan manual kedua parameter tersebut:

1. Tmed (Parameter Lokasi)

$$N = 7$$

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n \ln(ti)}{n}$$

$$\mu = \frac{12,652}{7}$$

$$\mu = 1,80743$$

$$\begin{aligned} Tmed &= e^{\mu} \\ &= e^{1,80743} \\ &= 6,09476 \end{aligned}$$

2. s (Parameter bentuk)

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [\ln(ti) - \mu]^2}{n}}$$

$$s = \sqrt{\frac{17,710}{7}}$$

$$s = 1,59058$$

4.3.7 Penentuan Nilai Tengah dari Distribusi Data Waktu Kerusakan (*Mean Time to Failure*)

Berikut ini merupakan nilai *Mean Time to Failure* (penentuan nilai Tengah) dari distribusi waktu antar kerusakan untuk distribusi normal:

$$MTTF = \mu$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{511}{6} \\
&= 85,16667 \\
&= 85,17
\end{aligned}$$

4.3.8 Penentuan Nilai Tengah dari Distribusi Data Waktu Perbaikan (*Mean Time to Repair*)

Berikut ini merupakan nilai *Mean Time to Repair* (penentuan nilai Tengah) dari distribusi waktu antar kerusakan untuk distribusi lognormal:

$$\begin{aligned}
\text{MTTR} &= t_{med.e} \frac{s^2}{2} \\
&= 6,09476.e^{\frac{1,59058^2}{2}} \\
&= 21,59363918 \\
&= 21,60
\end{aligned}$$

4.3.9 Penentuan Nilai Tengah dari Distribusi Data Waktu Perbaikan (*Mean Time to Repair*)

Perhitungan interval waktu pergantian pencegahan dengan minimasi *downtime* menggunakan metode *Age Replacement*. Input utama yang dibutuhkan meliputi *Mean Time to Failure* (MTTF), waktu perbaikan, waktu pergantian pencegahan, serta distribusi waktu kegagalan. Interval waktu antar kerusakan (t_p) dihitung untuk menentukan nilai dengan *downtime* terkecil berdasarkan analisis keandalan dan simulasi *downtime*. Berikut ini yaitu data-data yang dibutuhkan dalam mencari interval waktu pergantian pencegahan dengan minimasi *downtime*:

1. Data waktu kerusakan (*Time to Failure*) berdistribusi normal

$$\text{MTTF} = 85,16667$$

$$T_{med} = 68,16553$$

$$s = 0,70406$$

2. Waktu untuk melakukan pergantian kerusakan komponen

$$t_f = 21,60$$

3. Waktu untuk melakukan pergantian *preventive*

$$t_p = 21,60$$

Langkah selanjutnya adalah menghitung interval waktu pergantian pencegahan menggunakan data yang telah dikumpulkan. Perhitungan dilakukan melalui simulasi selama 420.000 menit, setara dengan 10 bulan operasional. Hasil dari perhitungan berada pada tabel berikut:

Tabel 4. 19 Interval Pergantian Komponen Menggunakan ARP

Interval Pergantian Komponen <i>Elbow Condenser</i> Dengan Model ARP					
tp	R(tp)	F(tp)	tp+Tp	(MTTF/F(tp))+Tf	D(tp)
1	1	3,231E-60	31095,840	3,893E+64	0,1982
1000	1	3,646E-11	32094,840	3,449E+15	0,1970
10000	0,999	5,892E-04	41094,840	2,135E+08	0,1864
20000	0,988	1,192E-02	51094,840	1,058E+07	0,1761
30000	0,954	4,612E-02	61094,840	2,758E+06	0,1676
40000	0,899	1,011E-01	71094,840	1,275E+06	0,1613
50000	0,831	1,690E-01	81094,840	7,753E+05	0,1567
60000	0,758	2,422E-01	91094,840	5,503E+05	0,1537
70000	0,684	3,155E-01	101094,840	4,297E+05	0,1518
80000	0,614	3,857E-01	111094,840	3,572E+05	0,1509
90000	0,549	4,510E-01	121094,840	3,100E+05	0,1507
100000	0,489	5,105E-01	131094,840	2,774E+05	0,1511
110000	0,436	5,643E-01	141094,840	2,540E+05	0,1518
120000	0,388	6,123E-01	151094,840	2,365E+05	0,1529
130000	0,345	6,551E-01	161094,840	2,231E+05	0,1542
140000	0,307	6,930E-01	171094,840	2,126E+05	0,1556
150000	0,273	7,265E-01	181094,840	2,042E+05	0,1571
160000	0,244	7,561E-01	191094,840	1,974E+05	0,1587
170000	0,218	7,823E-01	201094,840	1,919E+05	0,1604
180000	0,195	8,055E-01	211094,840	1,872E+05	0,1621
190000	0,174	8,259E-01	221094,840	1,834E+05	0,1637
200000	0,156	8,440E-01	231094,840	1,801E+05	0,1653
210000	0,140	8,600E-01	241094,840	1,773E+05	0,1669

220000	0,126	8,742E-01	251094,840	1,750E+05	0,1685
230000	0,113	8,867E-01	261094,840	1,729E+05	0,1700
240000	0,102	8,979E-01	271094,840	1,712E+05	0,1715
250000	0,092	9,079E-01	281094,840	1,696E+05	0,1729
260000	0,083	9,168E-01	291094,840	1,683E+05	0,1742
270000	0,075	9,247E-01	301094,840	1,671E+05	0,1755
280000	0,068	9,317E-01	311094,840	1,661E+05	0,1767
290000	0,062	9,381E-01	321094,840	1,652E+05	0,1779
300000	0,056	9,437E-01	331094,840	1,644E+05	0,1790
310000	0,051	9,488E-01	341094,840	1,636E+05	0,1800
320000	0,047	9,534E-01	351094,840	1,630E+05	0,1810
330000	0,043	9,575E-01	361094,840	1,624E+05	0,1820
340000	0,039	9,612E-01	371094,840	1,619E+05	0,1828
350000	0,035	9,645E-01	381094,840	1,615E+05	0,1837
360000	0,032	9,675E-01	391094,840	1,611E+05	0,1845
370000	0,030	9,703E-01	401094,840	1,607E+05	0,1852
380000	0,027	9,727E-01	411094,840	1,604E+05	0,1859
390000	0,025	9,750E-01	421094,840	1,601E+05	0,1866
400000	0,023	9,770E-01	431094,840	1,598E+05	0,1872
410000	0,021	9,788E-01	441094,840	1,596E+05	0,1878
420000	0,019	9,805E-01	451094,840	1,594E+05	0,1884
Min D(tp)					0,1507

Berikut ini merupakan perhitungan interval waktu pergantian pencegahan komponen dengan distribusi lognormal dengan $T_p = 90000$.

1. $F(t_p) = \Phi\left(\frac{1}{s} \ln \frac{t}{t_{med}}\right)$
 $= 0,4510$
2. $R(t_p) = 1 - F(t)$
 $= 1 - 0,4510$

$$= 0,549$$

$$3. (tp+Tp) \times R(tp) = 121094,840 \times 0,549$$

$$= 309984,4$$

$$4. D(tp) = \frac{Tp.R(tp)+Tf.(1-R(tp))}{(tp+Tp).R(t)+(M(tp)+Tf).(1-R(tp))}$$

$$= 0,1507$$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa nilai $D(tp)$ paling minimum tercapai pada $tp = 90000$. Dengan demikian, interval waktu optimal untuk pergantian komponen *Elbow Condenser* berdasarkan kriteria minimasi *downtime* adalah setiap 90000 menit atau sama dengan 62 hari.

4.3.10 Penentuan Interval Waktu Pemeliharaan

Langkah berikutnya adalah menghitung interval waktu pemeriksaan untuk komponen *Elbow Condenser*. Perhitungan ini bertujuan untuk menentukan jadwal pemeriksaan yang optimal guna mencegah kegagalan dan meminimalkan *downtime*. Berikut adalah hasil perhitungan interval waktu pemeriksaan untuk komponen *elbow condenser*

1. Jumlah pemeriksaan (k)

a. 1 Bulan = 30 hari kerja; 1 hari 24 jam kerja

b. $T = 30 \text{ hari/bulan} \times 24 \text{ jam/hari} = 720 \text{ jam/bulan}$

c. Jumlah kerusakan komponen 2022-2024 = 7 kali

d. $k = \frac{7}{36 \text{ bulan}} = 0,19444$

2. Waktu rata-rata yang dibutuhkan untuk perbaikan

a. MTTR = 518,247 jam

b. $T = 720 \text{ jam/bulan}$

c. $1/\mu = MTTR/t$
 $= 518,247/720$
 $= 0,71979$

$\mu = 1,3893$

3. Waktu rata-rata melakukan pemeriksaan

a. Waktu untuk melakukan pemeriksaan (t_i) = 432 jam

b. $T = 720$ jam/bulan

$$\begin{aligned} \text{c. } \frac{1}{i} &= \frac{t_i}{t} \\ &= \frac{432}{720} = 0,6 \end{aligned}$$

4. Perhitungan frekuensi pemeriksaan

$$\begin{aligned} n &= \sqrt{\frac{k.i}{\mu}} \\ &= \sqrt{\frac{0,19444 \cdot 1,667}{1,3893}} \\ &= 0,48297 \text{ kali pemeriksaan/bulan} \end{aligned}$$

5. Interval waktu pemeriksaan

$$\begin{aligned} \frac{t}{n} &= \frac{720}{0,48297} \\ &= 1490,76 \text{ jam} \\ &= 62 \text{ hari} \end{aligned}$$

BAB V

PEMBAHASAN

5.1 Analisis *Functional Block Diagram* (FBD)

Functional Block Diagram (FBD) merupakan diagram yang dibuat untuk menggambarkan fungsi pada proses mesin. Pada sistem pendinginan kondensor di Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), air laut dimanfaatkan sebagai media pendingin untuk mengembunkan uap bekas turbin. Proses ini dimulai dari pengambilan air laut melalui saluran masuk (*intake*), yang kemudian dialirkan ke tahap *screening* atau *filtering*. Pada tahap ini, air laut disaring menggunakan *bar screen* atau *travelling screen* guna menghilangkan kotoran seperti sampah, ganggang, dan organisme laut yang dapat merusak sistem. Setelah tersaring, air laut diteruskan melalui *inlet pipe* menuju *inlet elbow condenser*, yaitu pipa berbentuk siku yang mengarahkan aliran air ke dalam pipa-pipa pendingin pada kondensor.

Di dalam kondensor, air laut mengalir melalui sisi dalam *tube bundle*, sementara uap bekas dari turbin mengalir di sisi luar. Proses perpindahan panas dari uap ke air laut menyebabkan uap terkondensasi menjadi air (kondensat), sedangkan suhu air laut meningkat. Setelah proses ini, air laut dialirkan keluar melalui *outlet elbow condenser* menuju *aeration basin*. *Aeration basin* berfungsi menurunkan suhu air laut dan meningkatkan kadar oksigen terlarut melalui proses aerasi, sehingga air laut yang akan dikembalikan ke laut tidak membahayakan ekosistem. Tahap terakhir adalah pengembalian air laut ke lingkungan melalui saluran buang (*outfall*) setelah melewati proses pengkondisian tersebut. Seluruh sistem ini merupakan bagian dari skema *once-through cooling*, di mana air laut hanya digunakan satu kali dalam proses pendinginan sebelum dikembalikan ke laut.

5.2 Analisis *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA)

Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) merupakan sebuah metode untuk mengidentifikasi kemungkinan kegagalan atau kerusakan pada sebuah mesin atau komponen dan menganalisis dampaknya terhadap produksi, kualitas produk, dan keselamatan kerja. Dengan menilai risiko berdasarkan frekuensi dan tingkat keparahan masing-masing mode kegagalan, FMEA juga

digunakan untuk mencari nilai *Risk Priority Number* (RPN) untuk memprioritaskan tindakan pemeliharaan dan perbaikan.

Penilaian FMEA didapatkan dari hasil wawancara bersama dengan *expert* yaitu Mas Alif dari divisi *Reliability Engineering*, nilai *Risk Priority Number* (RPN) tertinggi pada *elbow condenser* disebabkan oleh material yang tidak sesuai (*improper material*), yaitu sebesar 270. Komponen tersebut berfungsi untuk menahan kebocoran pada bak sehingga air dan bahan kimia tidak keluar. Mode kegagalan utama yang teridentifikasi meliputi korosi dan *cracking*, dengan penyebab diantaranya seperti kualitas air bermasalah, pemeliharaan tidak sesuai, usia komponen, kerusakan pada *coating*, material asing didalam komponen, dan material komponen yang tidak sesuai. Mode kegagalan ini membuat efek kegagalan kebocoran air laut pada *elbow condenser*

Pada mode kegagalan korosi yang disebabkan oleh *improper material*, nilai *Severity* (S) adalah 9, *Occurrence* (O) sebesar 6, dan *Detection* (D) adalah 5. Berdasarkan nilai RPN yang diperoleh pada setiap mode dan penyebab kegagalannya, diperoleh nilai total RPN sebesar 1438 dari 10 penyebab kegagalan sehingga di peroleh nilai kritis pada komponen sebesar 143,8 yang terkualifikasi pada tingkat kritis tinggi (*high*) dengan bahaya dan resiko yang disebabkan masi bisa di toleransi (*tolerable*)

5.3 Analisis *Logic Tree Analysis* (LTA)

Logic Tree Analysis adalah sebuah *tools* untuk menganalisis penyebab kegagalan atau kerusakan dalam suatu komponen, sistem atau peralatan. LTA tujuan untuk menentukan tindakan pemeliharaan yang paling efektif. Dalam konteks manajemen keandalan pada sistem pendinginan PLTU, *elbow condenser* merupakan salah satu komponen kritis yang berfungsi sebagai jalur masuk dan keluar air laut untuk proses kondensasi uap. Berdasarkan pendekatan *Logic Tree Analysis* (LTA), dua kategori kegagalan yang dominan ditemukan pada *elbow condenser* adalah *Outage Problem* dan *Hidden Failure*, yang masing-masing memiliki implikasi strategis terhadap performa operasional dan kebutuhan sistem pemeliharaan. Berikut ini merupakan pengelompokkan komponen berdasarkan kegagalan yang terjadi:

1. Kategori B (*Outage problem*): Jika kegagalan komponen mengakibatkan seluruh atau sebagian mesin tidak beroperasi serta meningkatkan biaya dan kerugian ekonomi. Kategori *Outage Problem* mencerminkan jenis kegagalan yang berdampak langsung pada

terhentinya sebagian atau seluruh sistem operasi, sehingga secara langsung memengaruhi kontinuitas proses produksi dan efisiensi sistem. Dalam analisis ini, penyebab kegagalan seperti kualitas air yang buruk (*chlorin tinggi*), pemeliharaan yang tidak sesuai (*improper maintenance*), dan penggunaan material yang tidak sesuai spesifikasi (*improper material*) dikategorikan sebagai *outage problem*. Ketiga penyebab tersebut bersifat *evident*, yaitu dapat dikenali dengan cukup jelas oleh operator selama sistem masih beroperasi secara normal, dan memiliki potensi menyebabkan kegagalan fungsional sistem kondensasi.

2. Kategori D (*Hidden Failure*) merupakan kategori kegagalan yang lebih kompleks karena bersifat tidak terdeteksi selama kondisi operasi normal, namun dapat memicu kerusakan sekunder atau kegagalan sistem secara keseluruhan jika tidak ditangani. Penyebab seperti *aging* (penuaan elastomer), kerusakan pelapis (*coating damage*), dan masuknya material asing (*foreign material*) termasuk dalam kategori ini. Dalam banyak kasus, kegagalan laten ini tidak menunjukkan gejala signifikan hingga terjadi akumulasi degradasi yang menyebabkan kerusakan struktural atau fungsional yang lebih besar.

5.4 Analisis *Task Selection*

Task Selection adalah tahap pemilihan tindakan pemeliharaan yang sesuai berdasarkan analisis terhadap kerusakan peralatan, dengan tujuan untuk menjaga keandalan komponen dan meningkatkan efisiensi operasional sistem. Berdasarkan proses *task selection*, dilakukan penilaian terhadap tujuh kategori untuk menentukan jenis tindakan pemeliharaan (*maintenance task*) yang paling tepat. Kategori tersebut mencakup hubungan antara kegagalan dengan umur, efektivitas tindakan, kemungkinan deteksi dini, dan potensi pengaruh pada sistem. Hasilnya menunjukkan bahwa mayoritas penyebab kegagalan memerlukan pendekatan pemeliharaan yang bersifat *Condition Directed* (CD) dan *Time Directed* (TD), serta sebagian kecil memerlukan *Finding Failures* (FF).

Untuk penyebab korosi seperti *water quality*, *improper maintenance*, dan *aging*, metode yang dipilih adalah *Condition Directed* (CD) dan *Time Directed* (TD). Hal ini menunjukkan bahwa pemeliharaan perlu dilakukan secara berkala berdasarkan kondisi aktual dari komponen maupun masa pakai tertentu. Misalnya, elastomer yang mengalami degradasi seiring waktu dapat dijadwalkan pergantiannya melalui pendekatan *Time Directed*, sementara kerusakan akibat kualitas air laut yang buruk perlu dideteksi dan ditindaklanjuti melalui

inspeksi kondisi aktual (CD). *Coating damage*, di sisi lain, masuk dalam kategori *Finding Failures* (FF) karena kerusakannya bersifat tidak langsung terdeteksi dan memerlukan inspeksi berkala untuk mengidentifikasinya.

Pada mode kegagalan *cracking* (retak), penyebab seperti, *improper maintenance*, dan *aging* juga umumnya memerlukan tindakan *Condition Directed* (CD). Hal ini mengindikasikan bahwa retakan dapat dideteksi sebelum mencapai kondisi kritis melalui inspeksi atau monitoring, sehingga memungkinkan pergantian komponen sebelum kerusakan sistem terjadi. Beberapa penyebab juga diusulkan pendekatannya melalui *Time Directed* (TD), terutama jika pola keausan atau umur pakai komponen dapat diprediksi dengan cukup akurat.

Pada kasus kegagalan akibat *improper material*, *task selection* tidak dapat diklasifikasikan ke dalam *Time Directed* (TD), *Condition Directed* (CD), maupun *Finding Failures* (FF), karena akar masalahnya berada pada ketidaksesuaian spesifikasi material. Solusi ideal adalah pergantian total material, namun tindakan ini memerlukan *shutdown* selama ± 18 hari, yang menimbulkan kerugian ekonomi besar bagi perusahaan. Untuk itu, perusahaan memilih solusi sementara yang terklasifikasi pada pemeliharaan dengan pendekatan *Condition Directed* (CD) yaitu berupa *doubling plate*, yaitu pelat tambahan yang dilas pada bagian elbow yang rusak. Strategi ini merupakan bentuk *corrective maintenance* berbasis kondisi luar untuk mempertahankan fungsi sistem sambil menunda pergantian total hingga waktu *overhaul* yang lebih aman secara operasional dan ekonomis.

5.5 Analisis Penentuan Tindakan Pencegahan

Tindakan pemeliharaan pada *elbow condenser* dirancang berdasarkan hasil wawancara dengan *expert*, melalui pendekatan FMEA, *Logic Tree Analysis* (LTA), dan *Task Selection*. Berdasarkan pendekatan tersebut, disusunlah rekomendasi pemeliharaan preventif, prediktif, dan korektif yang bersifat teknis dan aplikatif, sesuai dengan kondisi nyata di lapangan. Tabel 5.1 berikut menampilkan rekomendasi tindakan pemeliharaan:

Tabel 5. 1 Usulan Tindakan Pemeliharaan

No	Mode Kegagalan	Penyebab Kegagalan	Tindakan Pemeliharaan
----	----------------	--------------------	-----------------------

1	Korosi	<i>Water Quality (chlorint)</i>	Pengendalian kadar chlorin; instalasi sistem pemantauan otomatis kualitas air laut.
		<i>Improper maintenance</i>	Jadwal <i>scheduled inspection</i> rutin dan audit pemeliharaan berbasis <i>checklist SOP</i> .
		<i>Aging</i>	Pergantian berkala berdasarkan <i>life cycle material</i> ; penerapan <i>Predictive Maintenance</i> (PdM).
		<i>Coating Damage</i>	Pemeriksaan visual dan NDT; <i>re-coating</i> saat tersedia waktu <i>shutdown</i> .
		<i>Foreign Material</i>	Instalasi <i>filter</i> berlapis saat <i>intake</i> ; pembersihan berkala dan flushing jalur <i>inlet pipe</i> .
		<i>Improper material</i>	Solusi sementara: inspeksi rutin dan <i>doubling plate</i> . Solusi permanen: ganti material ke SS316L/Cu-Ni saat tersedia waktu <i>shutdown</i> .
2	Cracking	<i>Foreign Material</i>	Tambahan <i>mesh screen</i> pada inlet dan jadwal pembersihan agresif di area <i>elbow condensor</i> .
		<i>Improper Maintenance</i>	Audit pelaksanaan SOP; pelatihan ulang teknisi dan inspeksi rutin permukaan serta struktur.
		<i>Aging</i>	Monitor dengan <i>condition monitoring</i> (CM) seperti vibrasi dan temperatur; jadwal pergantian periodik.
		<i>Improper material</i>	Solusi sementara: inspeksi rutin dan <i>doubling plate</i> . Solusi permanen: ganti material ke SS316L/Cu-Ni saat tersedia waktu <i>shutdown</i> .

Berdasarkan hasil wawancara pakar dan analisis FMEA, *improper material* pada *elbow condenser* memiliki nilai RPN tertinggi, menjadikannya penyebab kegagalan paling kritis. Kegagalan ini memicu korosi dan *cracking* yang berdampak langsung pada *shutdown* sistem dan tergolong *outage problem* dalam LTA. Namun, *task selection* menunjukkan bahwa penyebab ini tidak dapat ditangani dengan TD, CD, atau FF, karena akar masalahnya adalah kesalahan spesifikasi material. Solusi permanen adalah pergantian material ke SS316L atau Cu-Ni, namun membutuhkan *shutdown* ± 18 hari, yang berisiko menimbulkan kerugian

ekonomi besar. Oleh karena itu, sebagai solusi sementara, diterapkan inspeksi rutin dan pemasangan *doubling plate* untuk menjaga operasi tetap berjalan sambil menunda pergantian permanen hingga waktu *overhaul* terencana.

5.6 Analisis Distribusi *Time To Failure* dan *Time To Repair*

Pada analisis distribusi menggunakan 4 pengujian, yaitu distribusi eksponensial, normal, lognormal, dan *weibull*. Pengujian distribusi tersebut dilakukan terhadap waktu antar kerusakan (*Time To Failure*) dan waktu perbaikan (*Time To Repair*) pada komponen *elbow condenser*. Berikut ini merupakan hasil perhitungan *Index of Fit*:

Tabel 5. 2 Hasil Distribusi *Time to Failure*

Distribusi	Index Of Fit
Ekspensial	96,95%
Normal	97,23%
Lognormal	96,69%
<i>Weibull</i>	96,41%

Berdasarkan hasil pengujian *Index of Fit*, diketahui bahwa distribusi normal menunjukkan kecocokan tertinggi dengan data yang diuji, dengan nilai *Index of Fit* sebesar 97,23%. Distribusi normal dapat merepresentasikan pola data secara tepat. Hal ini menunjukkan bahwa data historis yang diuji memiliki karakteristik yang paling mendekati distribusi normal. Selanjutnya untuk hasil perhitungan data waktu perbaikan (*Time to Repair*).

Tabel 5. 3 Hasil Distribusi *Time to Repair*

Distribusi	Index Of Fit
Ekspensial	94,34%
Normal	81,75%
Lognormal	96,10%
<i>Weibull</i>	92,25%

Berdasarkan hasil pengujian *Index of Fit*, distribusi Lognormal memiliki nilai *Index of Fit* tertinggi, dengan presentase 96,10%.. Hal ini menunjukkan bahwa distribusi Lognormal paling sesuai dalam merepresentasikan pola data yang diuji.

5.7 Analisis Uji Kecocokan *Goodness of Fit*

Setelah diketahui bahwa distribusi dengan nilai *Index of Fit* tertinggi adalah distribusi normal untuk data *Time to Failure* dan distribusi lognormal untuk data *Time to Repair*, langkah selanjutnya adalah melakukan pengujian lanjutan guna memastikan kesesuaian data dengan distribusi tersebut. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk menilai sejauh mana data merepresentasikan pola waktu antar kerusakan (*time to failure*) dan waktu perbaikan (*time to repair*).

Kedua jenis data tersebut diuji menggunakan uji *Kolmogorov-Smirnov*. Hasil dari pengujian ini akan menentukan validitas distribusi yang telah diasumsikan. Apabila hasil menunjukkan bahwa H_0 diterima, maka dapat disimpulkan bahwa data empiris sesuai dengan distribusi yang diuji. Sebaliknya, penolakan H_0 menandakan distribusi tersebut tidak tepat. Berdasarkan hasil uji *Kolmogorov-Smirnov* untuk data *time to failure*, diperoleh nilai $D_n = 0,2209$ dan $D_{crit}(6; 0,05) = 0,519$. Karena $D_n < D_{crit}$ ($0,2209 < 0,519$), maka H_0 diterima dan data dinyatakan berdistribusi normal. Sementara itu, untuk data *time to repair*, diperoleh nilai $D_n = 0,2182$ dan $D_{crit}(7; 0,05) = 0,483$, sehingga H_0 juga diterima dan data dinyatakan mengikuti distribusi lognormal.

5.8 Analisis Parameter Distribusi TTF dan MTTF

Setelah pola distribusi serta data waktu antar kerusakan diketahui, langkah selanjutnya adalah menghitung *Mean Time To Failure* (MTTF). MTTF merupakan estimasi rata-rata waktu yang dibutuhkan hingga terjadi kegagalan pada suatu sistem. Perhitungan ini didasarkan pada distribusi yang telah ditentukan sebelumnya sebagai representasi dari data waktu antar kerusakan, yaitu distribusi normal. Tabel 5.4 menyajikan hasil perhitungan parameter distribusi beserta nilai MTTF.

Tabel 5. 4 Nilai Parameter TTF dan MTTF

Tmed (Parameter lokasi)	68,16553
s (Parameter bentuk)	0,70406
MTTF	85,16667

Berdasarkan hasil perhitungan menggunakan distribusi normal, diperoleh parameter lokasi (Tmed) sebesar 68,166, parameter bentuk (s) sebesar 0,704, dan nilai *Mean*

Time To Failure (MTTF) sebesar 85,167 hari. Nilai Tmed menggambarkan waktu median antar kerusakan, yang berarti 50% kejadian kegagalan terjadi sebelum dan sesudah waktu tersebut. Parameter bentuk s menunjukkan tingkat variasi data yang sedang, mengindikasikan bahwa penyebaran waktu kerusakan relatif konsisten. Adapun nilai MTTF yang cukup tinggi mencerminkan bahwa sistem memiliki tingkat keandalan operasional yang baik sebelum mengalami kegagalan.

5.9 Analisis Parameter Distribusi TTR dan MTTR

Setelah diperoleh hasil *Mean Time To Failure* (MTTF) dari data waktu antar kerusakan, langkah selanjutnya adalah menghitung *Mean Time To Repair* (MTTR) berdasarkan estimasi dari distribusi yang sesuai. Dalam hal ini, distribusi lognormal digunakan untuk merepresentasikan data waktu perbaikan. Berikut disajikan hasil perhitungan parameter distribusi dan nilai MTTR yang diperoleh.

Tabel 5. 5 Nilai Parameter TTR dan MTTR

Tmed (Parameter lokasi)	6,09476
s (Parameter bentuk)	1,59058
MTTR	21,59363918

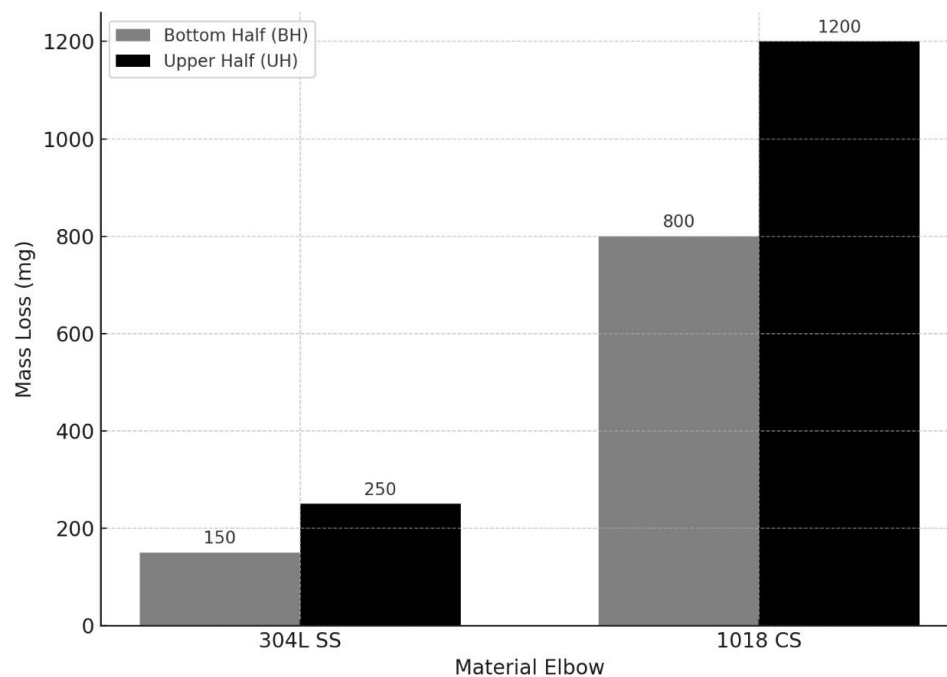
Hasil perhitungan menunjukkan bahwa nilai parameter lokasi (Tmed) adalah 6,095, dengan parameter bentuk (s) sebesar 1,591, serta nilai *Mean Time To Repair* (MTTR) sebesar 21,60 hari. MTTR ini mencerminkan estimasi rata-rata waktu yang dibutuhkan untuk memperbaiki sistem setelah mengalami kerusakan.

5.10 Analisis Interval Waktu Pergantian dan Pemeriksaan Komponen

Pada periode 2022–2024 telah terjadi 7 kali kerusakan pada *elbow condenser*, dengan rata-rata frekuensi sebesar 0,19444 kerusakan per bulan. Diperoleh bahwa nilai $D(tp)$ terkecil berada pada tp 90.000 menit, dengan nilai minimum $D(tp)$ sebesar 0,15306. Artinya, waktu optimal untuk pergantian komponen adalah setelah 90.000 menit atau sekitar 2 bulan kerja. Rata-rata waktu perbaikan (MTTR) tercatat 518,25 jam dengan frekuensi pemeriksaan adalah 0,483 kali per bulan, yang setara dengan satu kali pemeriksaan setiap 62 hari. Oleh karena itu, disarankan untuk melakukan tindakan pemeliharaan preventif setiap dua bulan sekali guna mengurangi risiko kegagalan dan menjaga keandalan sistem.

5.11 Analisis Usulan Pergantian Material Komponen

Dalam sistem kondensor PLTU, *elbow condenser* merupakan salah satu komponen perpipaan yang rawan mengalami degradasi akibat kombinasi erosi dan korosi. Pemilihan material sangat menentukan umur pakai serta biaya perawatan. Dua material yang umum digunakan adalah *carbon steel* (CS) dan *stainless steel* (SS). *Elbow condenser* berbahan *carbon steel* memiliki kelemahan utama berupa ketahanan korosi yang rendah. Pada kondisi operasi dengan fluida bercampur partikel padat, laju erosi-korosi pada *elbow condenser* bermaterial *carbon steel* tercatat jauh lebih tinggi dibandingkan *stainless steel*. Mekanisme degradasi yang terjadi biasanya berupa *pitting corrosion* serta pengelupasan material di permukaan *elbow condenser*. Berdasarkan penelitian (Khan, 2019), berikut merupakan grafik perbandingan antara *carbon steel* dan *stainless steel* dengan spesifikasi SS304L.



Gambar 5. 1 Grafik Perbandingan Material *Elbow Condenser*

Berdasarkan gambar diatas, *elbow condenser* berbahan *stainless steel* menunjukkan performa yang jauh lebih unggul. Studi ini mencatat bahwa laju degradasi *carbon steel* pada kondisi *slug flow* mencapai 4,12 kali lebih tinggi dibandingkan *stainless steel*. Bahkan dalam kondisi air laut, ketahanan *stainless steel* bisa mencapai 10–20 kali

lipat lebih baik dibandingkan *carbon steel*. Hal ini disebabkan oleh terbentuknya lapisan pasif Cr_2O_3 yang mampu melindungi permukaan material dari penetrasi korosif (Khan, 2019). Oleh karena itu, *stainless steel* lebih sesuai digunakan dalam sistem kondensor yang berhubungan langsung dengan air pendingin, terutama di lingkungan dengan kandungan garam tinggi. Pernyataan ini juga diperkuat melalui penelitian (Alfatah, 2022), yang menyatakan hasil uji elektrokimia dalam media air laut menunjukkan laju korosi *stainless steel* pada *elbow condenser* sangat rendah, yaitu hanya berkisar antara $4,5681 \times 10^{-3}$ mmPY hingga $8,6811 \times 10^{-3}$ mmPY. Sedangkan menurut penelitian, hasil uji elektrokimia menyatakan bahwa laju korosi pada material berbahan *carbon steel* memiliki laju korosi $1,833 \times 10^{-2}$ mmPY hingga $2,123 \times 10^{-2}$ mmPY (Hutama, 2018). Hal ini menandakan bahwa ketahanan laju korosi *stainless steel* mencapai 2,11 – 4,65 kali lebih tinggi daripada *carbon steel*.

Pemilihan material *elbow condenser* juga harus mempertimbangkan *trade-off* antara biaya awal (*capital cost*) dan biaya jangka panjang *life cycle cost* (LCC). Menurut penelitian yang membandingkan kedua material pada struktur terbuka yaitu sebuah jembatan. Material *carbon steel* yang sangat rentan terhadap korosi karena eksposur lingkungan terbuka mencatat bahwa biaya tahunan perawatan jembatan jalan raya dengan material *carbon steel* di Amerika Serikat untuk mencegah korosi mencapai 3,67–5,79 miliar USD (Kharoup, 2022). Bahkan, kerugian akibat gangguan lalu lintas yang ditimbulkan selama perawatan diperkirakan sepuluh kali lipat lebih besar dibandingkan biaya perawatan itu sendiri.

Pada studi kasus tersebut, *carbon steel* memang menawarkan biaya awal yang rendah (dinormalisasi = 1,0), tetapi total biaya perawatannya mencapai 6,17 kali biaya awal, sehingga total *life cycle cost* menjadi 6,88. Sebaliknya, *Stainless steel* memiliki biaya awal jauh lebih tinggi yaitu 4,40 kali biaya awal *carbon steel*, namun biaya perawatannya sangat kecil yaitu 0,21 kali biaya awal, sehingga total LCC hanya 4,596. Dengan demikian, meskipun *stainless steel* mahal di awal pemasangan, penghematan perawatan dalam jangka panjang menjadikannya lebih ekonomis dibandingkan *carbon steel* untuk struktur terbuka. Berikut tabel perbandingan rasio biaya material *carbon steel* dan *stainless steel*.

Tabel 5. 6 Rasio Perbandingan Biaya Material

Cost	Stainless Steel	Carbon Steel
<i>Initial Cost</i>	4,4	1
<i>Corrosion Protection cost</i>	0	0,15
<i>Total Initial Cost</i>	4,4	1,15
Maintenance cost		
<i>Corrosion costs</i>	0	5,33
<i>Traffic control and interruption</i>	0,21	0,84
<i>Total maintenance costs</i>	0,21	6,17
Decommisioning Cost		
<i>Destroy</i>	-	-
Residual Value		
<i>Value refunded</i>	0,03	-
LCC		
<i>Total cost containing maintenance</i>	4,596	6,88

Kedua studi, baik pada *elbow condenser* maupun pada struktur jembatan, sama-sama menunjukkan pola yang konsisten. Walaupun dari sisi ekonomi *carbon steel* lebih murah dan mudah diperoleh, namun umur pakainya cenderung lebih pendek serta memerlukan biaya perawatan tinggi, terutama bila digunakan pada fluida kondensor yang bersifat agresif. Sedangkan *stainless steel* memiliki biaya awal tinggi tetapi memberikan keunggulan dalam keandalan, ketahanan, dan efisiensi ekonomi sepanjang umur pakai. Oleh karena itu, pemilihan material tidak boleh hanya mempertimbangkan harga material pada tahap konstruksi, melainkan harus dilihat dari perspektif total biaya siklus hidup. Dalam kondisi operasi yang agresif, seperti paparan air laut atau lingkungan terbuka, *stainless steel* lebih unggul secara teknis maupun ekonomis sebagai bentuk investasi jangka panjang yang berorientasi pada keandalan sistem dan penghematan biaya perawatan.

BAB VI

PENUTUP

6.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Pada komponen yang diteliti, yaitu *elbow condenser* ditemukan bahwa nilai kritis komponen adalah 143,8 yang berarti bahwa tingkat kritisnya terklasifikasi tinggi (*high*) dengan resiko dan bahaya yang masi bisa ditoleransi (*tolerable*). Berdasarkan nilai RPN pada perhitunhan FMEA penyebab kegagalan utamanya adalah material yang tidak sesuai (*improper material*) dengan nilai sebesar 270 dan memicu korosi dan *cracking* yang berujung pada *outage* pada sistem.
2. Dikarenakan akar permasalahan terletak pada spesifikasi material yang tidak sesuai, strategi pemeliharaan seperti TD, CD, maupun FF tidak dapat diterapkan secara efektif. Solusi permanen berupa pergantian material dengan jenis yang tahan korosi seperti SS316L atau Cu-Ni memerlukan waktu shutdown sekitar 18 hari dan berisiko menimbulkan kerugian ekonomi yang signifikan. Oleh sebab itu, sebagai alternatif sementara, dilakukan inspeksi rutin dan pemasangan *doubling plate* hingga tersedia waktu *shutdown* atau *overhaul* yang terjadwal untuk pelaksanaan pergantian material secara menyeluruh. Pemilihan material SS316L dipertimbangkan karena terbukti memiliki ketahanan korosi 2,11 hingga 4,65 kali lebih tinggi dalam media air laut, serta mampu menekan *life cycle cost* menjadi 4,596 dibandingkan *carbon steel* yang mencapai 6,88. Dengan demikian, penggunaan SS316L tidak hanya memberikan perlindungan yang lebih andal terhadap degradasi material, tetapi juga menawarkan keuntungan jangka panjang dengan mengurangi frekuensi perawatan
3. Selama periode 2022–2024, *elbow condenser* mengalami kerusakan sebanyak 7 kali, dengan frekuensi rata-rata 0,19444 kerusakan per bulan. Hasil analisis menunjukkan nilai minimum D(tp) sebesar 0,15306 tercapai pada tp 90.000 menit, yang berarti waktu optimal pergantian komponen adalah setiap 90.000 menit atau sekitar 2 bulan operasional. Rata-rata waktu perbaikan (MTTR) tercatat sebesar 518,25 jam, sementara frekuensi inspeksi mencapai 0,483 kali per bulan, setara dengan satu kali setiap 62 hari. Oleh karena itu,

disarankan pelaksanaan pemeliharaan preventif setiap dua bulan untuk meminimalkan risiko kerusakan dan menjaga keandalan sistem.

6.2 Saran

Adapun saran-saran yang dapat diberikan kepada perusahaan sebagai berikut:

1. Peneliti menyarankan menerapkan metode *Reliability Centered Maintenance* (RCM) sebagai pendekatan utama dalam sistem pemeliharaan komponen. Penerapan metode ini memungkinkan perusahaan untuk menganalisis dan menentukan langkah-langkah pemeliharaan yang paling optimal
2. Berdasarkan hasil penelitian yang diperoleh dapat dijaikan rekomendasi pemeliharaan komponen *elbow condenser* dilakukan dengan interval waktu pemeriksaan setiap 2 bulan.
3. Disarankan agar melakukan pergantian material *elbow condenser* menjadi material dengan spesifikasi *Stainless Steel 316L*.

DAFTAR ISI

- Abbas, H. (2019). *ANALISA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP DI PLTU.*
- Afiva, W. H. (2019). *Penerapan Metode Reliability Centered Maintenance (RCM) pada Perencanaan Interval Preventive Maintenance dan Estimasi Biaya Pemeliharaan Menggunakan Analisis FMECA (Studi Kasus : PT. XYZ).*
- Alfatah, M. (2022). *Analisis laju korosi logam stainless steel 316L di media air laut menggunakan metode elektrokimia.*
- Arinta, E. N. (2020). *USULAN PERENCANAAN PERAWATAN MESIN DENGAN METODE RELIABILITY CENTERED MAINTENANCE (RCM) DAN AGE REPLACEMENT PADA MESIN SUBMERGED SCRAPER CHAIN CONVEYOR (SSCC) .*
- Aryanto, D. (2019). *ANALISIS KEGAGALAN PIPA ELBOW DARI HIGH PRESSURE HEATER (HPH) KE DEAERATOR PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP (PLTU).*
- Ashfania. (2021). *Optimisasi Dimensi Kanal Outfall Air Pendingin PLTU Dengan Memperhatikan Dampak Lingkungan Pada Air Laut.*
- Diputera, I. G. (2023). *Analisis Life cycle cost Pada Proyek Pembangunan Cendana Residence.*
- Fitriani, E. (2021). *USULAN PENENTUAN INTERVAL WAKTU PENGANTIAN KOMPONEN MENGGUNAKAN METODE AGE REPLACEMENT DI PT. XYZ.*
- Halim, J. K. (2019). *Respon Konsumen terhadap Iklan Email dari Biro Tur dan Perjalanan di Indonesia.*
- Hanif, R. Y. (2015). *PERBAIKAN KUALITAS PRODUK KERATON LUXURY DI PT. X DENGAN METODE FAILURE MODE AND EFFECT ANALYSIS (FMEA) dan FAULT TREE ANALYSIS (FTA).*
- Hendarti, D. R. (2024). *Perancangan Sistem Perawatan Pulverizer Model MVM31F menggunakan Metode Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) di PT XYZ.*
- Hutama. (2018). *ANALISA LAJU KOROSI CARBON STEEL PADA LINGKUNGAN BAHAN BAKAR.*
- Khan, R. (2019). *An Experimental Study on the Erosion-Corrosion Performance of AISI 1018 Carbon Steel and AISI 304L Stainless Steel 90-Degree Elbow Pipe.*
- Kharoup, O. (2022). *Life Cycle Costing of Structure Fabricate from Carbon and Stainless Steel.*
- Lesmono, M. A. (2022). *OPTIMALISASI BELT CONVEYOR DALAM PROSES COAL HANDLING PT SUMBER SEGARA PRIMADAYA, PLTU CILACAP, JAWA TENGAH.*
- Nababan, R. N. (2023). *ANALISIS PENJADWALAN SISTEM PERAWATAN MESIN MOLDING PADA PT KWONG FAI DI BATAM.*
- Nasution, M. (2021). *MANFAAT PERLUNYA MANAJEMEN PERAWATAN UNTUK BENGKEL MAUPUN INDUSTRI.*

- Nicola, H. A. (2022). *Analisis Keandalan Chain Submerged Scraper Conveyor pada PLTU Menggunakan Metode RCM di PT. ABC.*
- Nirwana, I. A. (2022). *Implementasi Metode Failure Mode Effect and Analysis (FMEA) Pada Siklus Air PLTU .*
- Permana, A. (2024). *Analisis Pengukuran Efektivitas Pengolahan Minyak Bumi dengan Penerapan Metode Overall Equipment Effectiveness (OEE) .*
- Rachmat, D. (2023). *Analisis Reliability, Maintainability, dan Availability Komponen Induced Draft Fan Boiler Sebagai Bahan Usulan Penjadwalan Pemeriksaan dan Penggantian Komponen (Studi Kasus PLTU PKS Pangkalan Pani PT. SMART Tbk).*
- Rudiana, I. F. (2024). *ANALISIS PEMELIHARAAN MESIN PRODUKSI DENGAN METODE RCM (Reliability Centered Maintenance) PADA PT. SURYA AGROLIKA REKSA.*
- Siagian, I. I. (2024). *Analisis Perawatan Mesin Kritis Menggunakan Metode Reliability Centered Maintenance di Manufaktur Kelapa Sawit.*
- Sinaga. (2020). *Pengaruh Motivasi dan Kompensasi terhadap kinerja Karyawan pada PT. Kereta Api Indonesia.*
- Syarifuddin. (2022). *PERANCANGAN PENJADWALAN PREVENTIVE MAINTENANCE MESIN BOILER DAN SCREW PRESS DENGAN MENGHITUNG MEAN TIME TO FAILURE DAN MEAN TIME TO REPAIR DI PT. BUMI SAMA GANDA.*
- Trianto, W. A. (2016). *PERENCANAAN PEKERJAAN COMBUSTION INSPECTION UNTUK MEMPERPENDEK DURASI SHUTDOWN TURBIN GAS MS-6001-B GE DI PT. PETROKIMIA GRESIK.*
- Violana, A. (2025). *ANALISIS KERUSAKAN MESIN GRINDING MENGGUNAKAN METODE FAILURE MODE AND EFFECT ANALYSIS (FMEA) DAN LOGIC TREE ANALYSIS (LTA) DI PT. SURI TANI PEMUKA.*
- Wardana, A. J. (2024). *Strategi Meningkatkan Keandalan Mesin Reader untuk Memperpendek Antrian Pada Gate 7 Gerbang Waru Ramp.*
- Wicaksono, N. R. (2024). *Penerapan Metode Reliability Centered Maintenance (RCM) untuk Menentukan Strategi Perawatan Mesin Pencacah Sampah Organik.*

LAMPIRAN

Pertanyaan *Reliability Centered Maintenance*

1. Apa fungsi & kegunaan dari *Elbow Condensor*? Standar apa yang harus dipenuhi Turbin Uap (Primer & Sekunder)

a. Fungsi Primer

Elbow condenser berfungsi sebagai jalur masuk (*inlet*) dan keluar (*outlet*) bagi air pendingin (umumnya air laut) yang digunakan untuk menyerap panas dari uap di dalam kondensor. Komponen ini memungkinkan aliran air pendingin menuju tabung-tabung kondensor dengan arah yang sesuai dan efisien. Untuk menjamin ketahanan terhadap korosi dan abrasi, *elbow condenser* harus terbuat dari material *carbon steel* yang telah diberi *rubber lining*, *coating*, dan cat anti korosi, terutama karena terpapar air laut yang bersifat korosif.

b. Fungsi Sekunder

Selain sebagai saluran aliran fluida, *elbow condenser* juga berperan dalam menjaga stabilitas tekanan dalam sistem pendinginan, membantu mengurangi turbulensi, dan mendukung efisiensi perpindahan panas dalam proses kondensasi uap menjadi air kondensat. *Elbow* yang didesain dengan sudut dan diameter yang sesuai akan meminimalkan kehilangan tekanan dan mencegah penumpukan kerak atau material asing yang dapat mengganggu performa sistem.

2. Bagaimana bisa dikatakan dalam kondisi gagal?

Elbow condenser dianggap dalam kondisi gagal (*failure*) jika memenuhi salah satu atau beberapa kondisi berikut:

- Terjadi *defect* besar, seperti retakan atau kebocoran parah yang menyebabkan gangguan pada aliran air pendingin.
- Kebocoran berskala besar yang berpotensi menurunkan tekanan sistem dan efisiensi proses kondensasi.

3. Apa modus kegagalan yang menyebabkan kondisi gagal? (Apa Penyebab Kegagalannya?)

terganggunya aliran air laut menuju kondensor, sehingga kapasitas pendinginan menurun.

2. **Turunnya Efisiensi Kondensor:**

Aliran air yang tidak optimal membuat proses kondensasi uap menjadi kurang efektif. Hal ini menyebabkan tekanan *back pressure* pada turbin meningkat, sehingga efisiensi termal pembangkit listrik menurun.

3. **Paparan Air Laut ke Peralatan Lain:**

Jika terjadi kebocoran besar, air laut dapat menyebar ke area atau peralatan lain yang tidak didesain untuk kontak langsung dengan air laut, seperti pipa uap, pompa, atau sistem kontrol. Hal ini dapat menyebabkan korosi, kerusakan komponen elektrik, dan risiko *shutdown* tak terencana.

5. **Apa dampak dan konsekuensi dari kegagalan tersebut? (dalam lingkup Keselamatan; Lingkungan; Operasi)**

Jawaban No. 5

a. Keselamatan

- Potensi air laut bocor atau menyempot ke area kerja, meningkatkan risiko kecelakaan kerja (terpeleset, terkena tekanan air tinggi, atau terkena material korosif).
- Kelembapan tinggi akibat kebocoran dapat merusak peralatan kelistrikan di sekitarnya dan memicu risiko korsleting listrik.
- Membahayakan teknisi saat inspeksi atau perbaikan di area lembap atau tergenang.

b. Lingkungan

- Kebocoran besar menyebabkan genangan atau banjir lokal di area ruang pompa atau galeri pipa.
- Air laut yang tumpah dapat mencemari area yang tidak dirancang untuk menampung air asin, mempercepat kerusakan struktural dan menurunkan kualitas lingkungan lokal di sekitar pembangkit

c. Operasional

- Flow air pendingin menurun, mengganggu sirkulasi pendinginan pada kondensor.
- Penurunan tekanan vakum pada kondensor, menyebabkan turbin bekerja kurang efisien.
- Penurunan beban unit pembangkit, sehingga daya listrik yang dihasilkan menurun.
- Efek berantai terhadap efisiensi termal PLTU secara keseluruhan, dan dapat memicu *shutdown unit* jika dibiarkan

No	Nama Komponen atau Proses	Mode Kegagalan	Efek Kegagalan	Penyebab Kegagalan	Severity (S)	Occurrence (O)	Detection (D)	RPN
1.	Elbow Pipe Condensor	Korosi	Kebocoran Air Laut	Water Quality (chroint)	2	2	2	8
				Improper maintenance	4	3	4	48
				Aging (elastomer)	5	4	5	100
				Coating Damage	8	5	6	240
				Foreign Material	4	6	2	48
				Improper material	9	6	5	270
		Cracking	Kebocoran Air Laut	Foreign Material	7	5	4	140
				Improper Maintenance	7	5	5	175
				Aging	6	5	4	120
				Improper material	9	6	5	270

