



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



**EVALUASI KEANDALAN RANTAI SUBMERGED SCRAPER CONVEYOR
(SSC) PADA SISTEM BOTTOM ASH DI PLTU PT XYZ BERDASARKAN
DISTRIBUSI WEIBULL**

SKRIPSI

Oleh:

Muhammad Hamdi

NIM. 2202421022

**POLITEKNIK
NEGERI
JAKARTA**

**PROGRAM STUDI SARJANA TERAPAN
TEKNOLOGI REKAYASA PEMBANGKIT ENERGI
JURUSAN TEKNIK MESIN
POLITEKNIK NEGERI JAKARTA**

2026



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



**EVALUASI KEANDALAN RANTAI SUBMERGED SCRAPER CONVEYOR
(SSC) PADA SISTEM BOTTOM ASH DI PLTU PT XYZ BERDASARKAN
DISTRIBUSI WEIBULL**

SKRIPSI

Oleh:

Muhammad Hamdi

NIM. 2202421022

**POLITEKNIK
NEGERI
JAKARTA**

**PROGRAM STUDI SARJANA TERAPAN
TEKNOLOGI REKAYASA PEMBANGKIT ENERGI
JURUSAN TEKNIK MESIN
POLITEKNIK NEGERI JAKARTA**

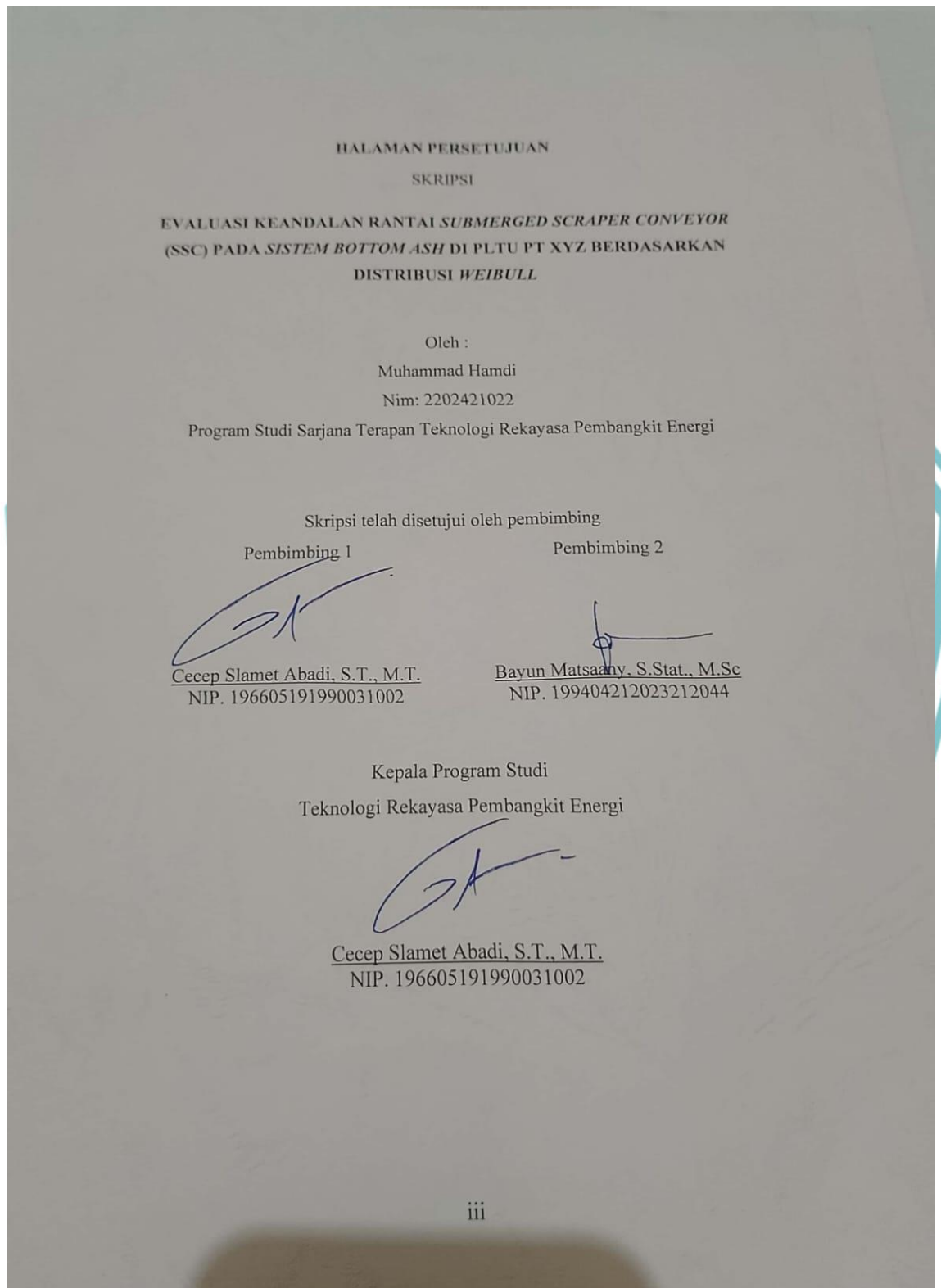
2026



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta





Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

HALAMAN PENGESAHAN

SKRIPSI

EVALUASI KEANDALAN RANTAI *SUBMERGED SCRAPER CONVEYOR*
(SSC) PADA *SISTEM BOTTOM ASH* DI PLTU PT XYZ BERDASARKAN
DISTRIBUSI *WEIBULL*

Oleh :

Muhammad Hamdi

Nim: 2202421022

Program Studi Sarjana Terapan Teknologi Rekayasa Pembangkit Energi
Telah berhasil dipertahankan dalam sidang sarjana terapan (atau skripsi) di hadapan
Dewan Penguji pada tanggal 7 Juli 2026 dan diterima sebagai persyaratan untuk
memperoleh gelar Sarjana Terapan (Diploma IV) pada Program Studi Sarjana
Terapan Teknologi Rekayasa Pembangkit Energi, Jurusan Teknik Mesin.

DEWAN PENGUJI

No	Nama	Posisi Penguji	Tanda Tangan	Tanggal
1	Bayun Matsaany, S.Stat., M.Sc NIP. 199404212023212044	Ketua		21/07/2026
2	Ir.Andi Ulfiana, M.Si. NIP. 196208021990032002	Penguji 1		23/07/2026
3	P. Jannus, S.T., M.T. NIP. 196304261988031004	Penguji 2		24/07/2026

Depok, 7 Juli 2026

Disahkan oleh :

Ketua Jurusan Teknik Mesin

Dr. Fuad Zainuri., S.T., M.Si
NIP. 197602252000121002



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

LEMBAR PERNYATAAN ORISINALITAS

Saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Muhammad Hamdi
NIM : 2202421022
Program Studi : Teknologi Rekayasa Pembangkit Energi

Menyatakan bahwa yang dituliskan di dalam Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri bukan jiplakan (plagiasi) karya orang lain baik sebagian atau seluruhnya. Pendapat, gagasan, atau temuan orang lain yang terdapat di dalam skripsi telah saya kutip dan saya rujuk sesuai dengan etika ilmiah.
Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya.

Depok, 7 Juli 2026


50AA5AMX334669210
Muhammad Hamdi
NIM. 2202421022



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

EVALUASI KEANDALAN RANTAI *SUBMERGED SCRAPER CONVEYOR* (SSC) PADA *SISTEM BOTTOM ASH* DI PLTU PT XYZ BERDASARKAN *DISTRIBUSI WEIBULL*

Muhammad Hamdi¹, Cecep Slamet Abadi^{2*}, Bayun Matsaany³

^{1,2}Program Studi Teknologi Rekayasa Pembangkit Energi, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Jakarta, Jl. Prof. G. A. Siwabessy, Kampus UI, Depok, 16425

³Program Studi Rekayasa Teknologi Manufaktur, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Jakarta, Jl. Prof. G. A. Siwabessy, Kampus UI, Depok, 16425

Email : Muhammad.hamdi.tm22@mhsw.pnj.ac.id

ABSTRAK

bottom ash handling system pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) berperan penting dalam proses pembuangan abu dasar hasil pembakaran batubara, dengan *Submerged Scraper Conveyor* (SSC) sebagai komponen utamanya. Rantai (*chain*) SSC merupakan komponen kritis yang sering mengalami kegagalan akibat keausan, sehingga berpotensi menyebabkan *downtime* dan menurunkan ketersediaan pembangkit. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi keandalan rantai SSC Unit 2 PLTU PT XYZ menggunakan distribusi *Weibull* dua parameter sebagai dasar penentuan interval perawatan pencegahan (*preventive maintenance*) yang optimal. Data yang digunakan adalah data historis *Time To Failure* (TTF) yang diperoleh dari catatan *Work Order* periode Januari 2021 hingga Januari 2026, sebanyak 45 data TTF valid. Estimasi parameter distribusi *Weibull* dilakukan dengan metode *Maximum Likelihood Estimation* (MLE) menggunakan Python. Hasil penelitian menunjukkan nilai parameter bentuk $\beta = 1,1979$ dan parameter skala $\eta = 43,4449$ hari. Nilai $\beta > 1$ menunjukkan bahwa rantai SSC berada pada fase *wear-out* (keausan) dengan laju kegagalan yang meningkat seiring waktu. Nilai *Mean Time To Failure* (MTTF) diperoleh sebesar 40,89 hari. Berdasarkan analisis keandalan, interval *preventive maintenance* yang optimal adalah setiap 21 hari pada tingkat keandalan 65,80%, yang meningkatkan keandalan saat perawatan sebesar 26,46% dibandingkan kondisi eksisting (39,34%). Penerapan interval ini diharapkan dapat menurunkan probabilitas kegagalan mendadak dan mengurangi *downtime bottom ash handling system*.

Kata Kunci: keandalan, *preventive maintenance*, rantai SSC, distribusi *Weibull*, MTTF



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

EVALUATION OF THE RELIABILITY OF THE SUBMERGED SCRAPER CONVEYOR (SSC) CHAIN IN THE BOTTOM ASH SYSTEM AT PLTU PT XYZ BASED ON THE WEIBULL DISTRIBUTION

Muhammad Hamdi¹, Cecep Slamet Abadi^{2*}, Bayun Matsaany³

^{1,2}Program Studi Teknologi Rekayasa Pembangkit Energi, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Jakarta, Jl. Prof. G. A. Siwabessy, Kampus UI, Depok, 16425

³Program Studi Rekayasa Teknologi Manufaktur, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Jakarta, Jl. Prof. G. A. Siwabessy, Kampus UI, Depok, 16425

Email : Muhammad.hamdi.tm22@mhsw.pnj.ac.id

ABSTRACT

The bottom ash handling system in a Steam Power Plant (PLTU) plays an important role in discharging the bottom ash produced from coal combustion, with the *Submerged Scraper Conveyor* (SSC) as its main component. The SSC chain is a critical component that frequently fails due to wear, potentially causing downtime and reducing plant availability. This study aims to evaluate the reliability of the SSC chain of Unit 2 at PLTU PT XYZ using the two-parameter Weibull distribution as a basis for determining the optimal *preventive maintenance* interval. The data used are historical *Time To Failure* (TTF) data obtained from Work Order records for the period of January 2021 to January 2026, comprising 45 valid TTF data points. The Weibull distribution parameters were estimated using the *Maximum Likelihood Estimation* (MLE) method in Python. The results show a shape parameter $\beta = 1.1979$ and a scale parameter $\eta = 43.4449$ days. A value of $\beta > 1$ indicates that the SSC chain is in the *wear-out* phase, with a failure rate that increases over time. The *Mean Time To Failure* (MTTF) was found to be 40.89 days. Based on the reliability analysis, the optimal *preventive maintenance* interval is every 21 days at a reliability level of 65.80%, which improves the reliability at maintenance by 26.46% compared with the existing condition (39.34%). The implementation of this interval is expected to reduce the probability of sudden failure and minimise the downtime of the bottom ash handling system.

Keywords: *reliability, preventive maintenance, SSC chain, Weibull distribution, MTTF*



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

HALAMAN PERSEMBAHAN

Skripsi ini penulis persembahkan untuk

Almarhumah Bunda Tercinta,

Rosiyanti Chaniago

Meskipun penulis hanya sempat mengenal Bunda hingga usia dua tahun, dan tidak banyak kenangan yang dapat penulis ingat, penulis percaya bahwa kasih sayang dan doa Bunda telah menjadi bagian dari setiap langkah hidup penulis hingga hari ini.

Penulis tumbuh dengan cerita tentang Bunda, dan dari cerita itulah penulis belajar bahwa cinta seorang ibu tidak pernah terbatas oleh waktu maupun kehadiran. Karya ini penulis persembahkan sebagai wujud bakti dan cinta untuk Bunda yang selalu penulis rindukan.

Semoga Allah SWT menempatkan Bunda di tempat terbaik di sisi-Nya, mengampuni segala khilaf, dan melimpahkan rahmat serta kasih sayang-Nya.

Aamiin.

*“Walau hanya sebentar Bunda di dunia,
cinta dan doanya menemani penulis selamanya.”*
Serta penulis persembahkan untuk almamater tercinta,

Politeknik Negeri Jakarta

Dengan penuh cinta dan rindu,

Muhammad Hamdi



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas rahmat dan karunia-Nya sehingga skripsi ini dapat diselesaikan. Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat penyusunan tugas akhir pada Program Studi Sarjana Terapan Teknologi Rekayasa Pembangkit Energi, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Jakarta, dengan judul “Evaluasi Keandalan Rantai *Submerged Scraper Conveyor* (SSC) pada Sistem *Bottom Ash* di PLTU PT XYZ Berdasarkan Distribusi *Weibull*.

Dalam penyusunan skripsi ini, penulis banyak memperoleh bantuan, bimbingan, dan dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Kedua orang tua penulis tercinta, Papi dan Mimi, yang senantiasa memberikan doa, kasih sayang, serta dukungan moral maupun material yang tiada henti.
2. Dr. Fuad Zainuri, S.T., M.Si., selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Jakarta.
3. Cecep Slamet Abadi, S.T., M.T., selaku Kepala Program Studi sekaligus dosen pembimbing skripsi yang telah memberikan bimbingan dan arahan dengan penuh kesabaran.
4. Bayun Matsuany, S.Stat., M.Sc., selaku dosen pembimbing skripsi yang telah memberikan masukan dan bimbingan yang sangat berharga.
5. Seluruh dosen Program Studi Sarjana Terapan Teknologi Rekayasa Pembangkit Energi yang telah memberikan ilmu dan pengetahuan selama masa perkuliahan.
6. Abang penulis, Saddam Hussein, dan Aa penulis, Muammar Khadafi, yang selalu memberikan semangat dan dukungan kepada penulis.
7. Seseorang yang istimewa, yang senantiasa menemani, membantu, dan memberikan semangat kepada penulis dalam suka maupun duka selama proses penyusunan skripsi ini.
8. Teman-teman seperjuangan magang, Hisyam dan Binti, yang telah menjadi rekan diskusi dan saling mendukung selama proses penelitian.



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

9. Pihak PT XYZ serta seluruh pihak yang telah membantu penulisan skripsi ini yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu.
10. Teman-teman penulis di Program Studi Teknologi Rekayasa Pembangkit Energi, khususnya teman-teman kelas A, yang telah memberikan kebersamaan, dukungan, dan kenangan selama masa perkuliahan.
11. Terakhir, penulis ingin berterima kasih kepada diri sendiri, Muhammad Hamdi, yang masih terus belajar memahami hidup. Terima kasih telah bertahan sejauh ini dan tetap berjalan melewati setiap tantangan. Bangga atas setiap langkah kecil yang diambil, meski tak selalu terlihat orang lain. Teruslah berusaha, dan percayalah bahwa setiap mimpi akan terjawab pada waktunya.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih memiliki kekurangan. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan. Semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan di bidang keandalan dan manajemen perawatan sistem pembangkit listrik.

Depok, 7 Juli 2026

Hormat Saya,

**POLITEKNIK
NEGERI
JAKARTA**

Muhammad Hamdi
2202421022



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

DAFTAR ISI

HALAMAN PERSEMBAHAN	viii
KATA PENGANTAR	ix
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL	xiv
DAFTAR LAMPIRAN	xv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang Penelitian	1
1.2 Rumusan Masalah Penelitian	2
1.3 Pertanyaan Penelitian	3
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian	3
1.6 Batasan Masalah	4
1.7 Sistematika Penulisan Skripsi	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Landasan Teori	7
2.1.1 Sistem Penanganan Abu (<i>Ash Handling System</i>)	7
2.1.1.1 Karakteristik <i>Bottom Ash</i> dan <i>Fly Ash</i>	7
2.1.1.2 Prinsip Kerja <i>Submerged Scraper Conveyor</i>	8
2.1.1.3 Komponen Kritis dan Mekanisme Kegagalan Material	9
2.1.2 Manajemen Perawatan dan Keandalan (<i>Reliability</i>)	10
2.1.2.1 Strategi Perawatan Industri	11
2.1.2.2 Teori Keandalan dan Laju Kegagalan	12
2.1.3 Analisis Distribusi <i>Weibull</i>	14
2.1.3.1 Karakteristik Distribusi <i>Weibull</i> Dua Parameter	15
2.1.3.2 Estimasi Parameter Distribusi <i>Weibull</i> dengan <i>Maximum Likelihood Estimation (MLE)</i>	17
2.1.4 Optimalisasi Interval Perawatan	19
2.2 Kajian Literatur	19
2.3 Kerangka Pemikiran dan Pengembangan	25
2.3.1 Kerangka Pemikiran	25
2.3.2 Pengembangan Hipotesis	26
2.3.2.1 Hipotesis Penyebab Kerusakan	26
2.3.2.2 Hipotesis Langkah Perbaikan	27



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

2.3.2.3 Hipotesis Hasil Perbaikan	27
BAB III METODE PENELITIAN	28
3.1 Jenis Penelitian.....	28
3.1.1 Diagram Alir Penelitian	29
3.2 Objek Penelitian.....	30
3.3 Metode Pengambilan Sampel	30
3.3.1 Kriteria Pemilihan Sampel	31
3.3.2 Metode Pengambilan Data	31
3.3.3 Uji Kecukupan Data	31
3.4 Jenis dan Sumber Data Penelitian	32
3.4.1 Variabel dan Parameter Penelitian	32
3.4.2 Karakteristik Data.....	33
3.4.3 Tabel Data Historis (Lampiran)	33
3.5 Metode Pengumpulan Data Penelitian	34
3.6 Metode Analisis Data	34
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	36
4.1 Perangkat Lunak yang Digunakan	36
4.2 Pengolahan Data <i>Time To Failure</i> (TTF).....	37
4.2.1 Statistik Deskriptif Data TTF.....	38
4.3 Estimasi Parameter Distribusi <i>Weibull</i> dengan Metode MLE	38
4.3.1 Interpretasi Parameter <i>Weibull</i>	39
4.3.2 Validasi Kesesuaian Distribusi (<i>Goodness of Fit</i>)	40
4.4 Analisis Keandalan Rantai SSC.....	41
4.4.1 Fungsi Keandalan <i>Rt</i>	42
4.4.2 Fungsi Laju Kegagalan <i>ht</i>	43
4.4.3 <i>Mean Time To Failure</i> (MTTF)	44
4.5 Penentuan Interval <i>Preventive Maintenance</i> Optimal.....	45
4.5.1 Perbandingan dengan Kondisi Perawatan Eksisting	47
4.6 Ringkasan Hasil Analisis.....	48
BAB V KESIMPULAN	50
5.1 Kesimpulan	50
5.2 Saran.....	51
DAFTAR PUSTAKA	52
LAMPIRAN	54



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Kurva Bathtub	13
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian	29
Gambar 3.2 Submerged Scraper Conveyor (SSC)	30
Gambar 4.1 Kurva Fungsi Keandalan $R(t)$ Rantai SSC.....	42
Gambar 4.2 Kurva Fungsi Laju Kegagalan $h(t)$ Rantai SSC	44
Gambar 4.3 Kurva Penentuan Interval PM Optimal 21 Hari.....	47





Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Ringkasan Penelitian Terdahulu	25
Tabel 3.1 Variabel dan Parameter Penelitian	32
Tabel 3.2 Karakteristik Data Penelitian	33
Tabel 4.1 Perangkat Lunak yang Digunakan dalam Penelitian.....	36
Tabel 4.2 Jenis Kerusakan Rantai SSC sebagai Variabel Bebas (X)	37
Tabel 4.3 Hasil Uji Kesesuaian Distribusi (Goodness of Fit) Data TTF Rantai SSC	40
Tabel 4.4 Nilai Keandalan R_t , Probabilitas Kegagalan F_t , dan Laju Kegagalan h_t	43
Tabel 4.5 Interval Preventive Maintenance Optimal Berdasarkan Target Keandalan	46
Tabel 4.6 Rekapitulasi Hasil Analisis Keandalan sebagai Variabel Terikat (Y) ..	49

**POLITEKNIK
NEGERI
JAKARTA**



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Daftar Riwayat Hidup	54
Lampiran 2. Data Historis Kerusakan dan TTF Rantai SSC.....	55
Lampiran 3. Script Python Analisis Keandalan	58





Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Penelitian

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) PT XYZ memegang peranan vital dalam menjamin ketersediaan pasokan listrik nasional. Kelancaran operasi PLTU ini sangat bergantung pada keandalan sistem pendukungnya, salah satunya adalah *bottom ash handling system* yang bertugas menangani limbah abu panas dari dasar *boiler*. Karakteristik *bottom ash* yang kasar, abrasif, dan bervolume besar menuntut sistem penanganan yang tangguh. Sebagaimana dijelaskan oleh James et al. (2012), interaksi langsung antara partikel keras abu dengan komponen mekanis bergerak dapat mempercepat degradasi peralatan, sehingga keandalan sistem ini menjadi faktor kunci dalam menjaga kontinuitas operasi pembangkit.

Dalam sistem penanganan abu ini, *Submerged Scraper Conveyor* (SSC) merupakan peralatan utama, di mana rantai (*chain*) berfungsi sebagai elemen kritis penarik *scraper*. Rantai ini beroperasi di lingkungan yang sangat ekstrem: terendam air panas dan terus-menerus bergesekan dengan partikel abu. Kondisi ini memicu mekanisme keausan abrasif dan adhesif (*abrasive and adhesive wear*) yang mempercepat degradasi fisik rantai (Nicola et al., 2022) menyoroti bahwa keausan progresif pada komponen rantai sering kali menjadi penyebab utama kegagalan tak terduga yang berujung pada *shutdown* unit. Gangguan pada rantai SSC tidak hanya menghentikan proses pembuangan abu, tetapi juga berpotensi mematikan operasional *boiler* secara keseluruhan.

Dampak dari kegagalan rantai SSC tidak hanya bersifat teknis, tetapi juga berimplikasi signifikan terhadap efisiensi operasional dan biaya perawatan perusahaan. Strategi pemeliharaan yang kurang tepat dapat menyebabkan meningkatnya frekuensi kerusakan serta biaya perbaikan akibat downtime yang tidak terencana. Menurut (Wibowo et al., 2018), penerapan strategi pemeliharaan yang tepat mampu mengurangi biaya perawatan dan meningkatkan keandalan peralatan. Oleh karena itu, diperlukan pergeseran dari strategi perawatan reaktif



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

menuju strategi berbasis keandalan yang mampu memprioritaskan komponen kritis seperti rantai SSC demi efisiensi biaya dan sumber daya.

Sebagian besar penelitian terdahulu mengenai strategi pemeliharaan komponen mekanis masih menggunakan pendekatan *Mean Time Between Failure (MTBF)* maupun *Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)* yang hanya menggambarkan rata-rata kerusakan atau prioritas kegagalan, tetapi belum mampu menggambarkan perubahan karakteristik kegagalan seiring bertambahnya umur operasi. Padahal, pada komponen yang mengalami keausan progresif seperti rantai SSC, informasi pola laju kegagalan terhadap waktu sangat penting. Oleh karena itu, penelitian ini menggunakan distribusi *Weibull* dua parameter berdasarkan data historis *Work Order* selama lima tahun (Januari 2021–Januari 2026), sehingga interval *preventive maintenance* yang dihasilkan benar-benar mencerminkan karakteristik kegagalan aktual rantai SSC.

Untuk menyusun strategi pemeliharaan yang efektif, diperlukan evaluasi keandalan (*reliability*) yang akurat guna memprediksi perilaku kegagalan komponen. Metode statistik Distribusi *Weibull* dinilai sangat relevan untuk menganalisis komponen yang mengalami degradasi bertahap seperti rantai konveyor. Aslam et al. (2025) menegaskan bahwa distribusi ini mampu memodelkan karakteristik penuaan (*aging*) dan laju kegagalan secara realistis, mulai dari fase kegagalan awal hingga fase keausan (*wear-out*). Dengan menggunakan pendekatan ini, estimasi umur pakai komponen dapat ditentukan secara presisi sebagai dasar pengambilan keputusan perawatan.

1.2 Rumusan Masalah Penelitian

Permasalahan utama yang dikaji dalam penelitian ini adalah tingginya frekuensi kegagalan pada rantai *Submerged Scraper Conveyor (SSC)* di *bottom ash handling system* PT XYZ yang berdampak pada *downtime* unit. Belum adanya evaluasi kuantitatif mengenai karakteristik kegagalan dan pola umur pakai rantai menyebabkan strategi perawatan yang diterapkan saat ini belum optimal. Oleh karena itu, diperlukan analisis keandalan menggunakan metode distribusi *Weibull* untuk menentukan parameter kegagalan serta interval perawatan yang tepat guna meningkatkan ketersediaan sistem.



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

1.3 Pertanyaan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang telah diuraikan, maka pertanyaan penelitian yang akan dijawab dalam studi ini adalah:

1. Bagaimana karakteristik distribusi kegagalan komponen rantai *Submerged Scraper Conveyor* (SSC) di PT XYZ berdasarkan penentuan parameter bentuk (*shape parameter*, β) dan parameter skala (*scale parameter*, η) pada distribusi *Weibull*?
2. Berapa nilai tingkat keandalan (*reliability*) dan taksiran umur rata-rata sebelum kerusakan (*Mean Time To Failure*) dari rantai SSC pada kondisi operasional saat ini?
3. Berapa interval waktu perawatan pencegahan (*preventive maintenance interval*) yang paling optimal untuk diterapkan guna meminimalisir probabilitas kegagalan dan *downtime* pada *bottom ash handling system*?

1.4 Tujuan Penelitian

Berdasarkan pertanyaan penelitian yang telah dirumuskan, tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini adalah:

1. Menentukan parameter distribusi *Weibull*, yaitu parameter bentuk (*shape parameter*, β) dan parameter skala (*scale parameter*, η), yang merepresentasikan karakteristik kegagalan rantai *Submerged Scraper Conveyor* (SSC) di PT XYZ.
2. Menganalisis tingkat keandalan (*reliability*) dan mengestimasi umur rata-rata sebelum kerusakan (*Mean Time To Failure*) dari komponen rantai SSC berdasarkan data operasional yang tersedia.
3. Menentukan interval waktu perawatan pencegahan (*preventive maintenance interval*) yang optimal guna meminimalisir frekuensi *downtime* dan meningkatkan ketersediaan *bottom ash handling system*.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat yang signifikan, baik secara teoritis maupun praktis, yaitu sebagai berikut:



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

1. Bagi Perusahaan (PT XYZ)
 - a. Memberikan gambaran kuantitatif mengenai kondisi keandalan aktual komponen rantai *Submerged Scraper Conveyor* (SSC) di unit pembangkit.
 - b. Memberikan rekomendasi interval perawatan (*maintenance interval*) yang lebih optimal dan terukur secara ilmiah untuk mencegah terjadinya kerusakan mendadak (*breakdown*).
 - c. Membantu perusahaan dalam menyusun strategi pemeliharaan yang efektif guna meningkatkan ketersediaan (*availability*) sistem dan efisiensi biaya operasional *bottom ash handling system*.
2. Bagi Pengembangan Ilmu Pengetahuan (Akademis)
 - a. Menambah referensi dan literatur mengenai aplikasi metode distribusi *Weibull* dalam analisis keandalan peralatan mekanis di industri pembangkit listrik.
 - b. Sebagai bahan perbandingan atau rujukan bagi penelitian selanjutnya yang berkaitan dengan sistem penanganan abu (*Ash Handling System*) maupun manajemen perawatan mesin.
3. Bagi Penulis
 - a. Mengimplementasikan teori manajemen perawatan dan statistik keandalan yang telah dipelajari di bangku perkuliahan ke dalam kasus nyata di dunia industri.
 - b. Meningkatkan pemahaman mengenai mekanisme kerja dan pola kegagalan pada peralatan *Submerged Scraper Conveyor* (SSC).

1.6 Batasan Masalah

Agar penelitian ini lebih terarah dan fokus pada permasalahan utama, penulis menetapkan batasan masalah sebagai berikut:

1. Objek penelitian difokuskan hanya pada komponen rantai (*chain*) unit *Submerged Scraper Conveyor* (SSC) di PLTU PT XYZ.
2. Data kerusakan yang digunakan adalah data historis operasional dan perawatan rantai SSC Unit 2 yang diperoleh dari catatan Work Order (WO)



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

sistem pemeliharaan PLTU PT XYZ selama periode Januari 2021 sampai dengan Januari 2026.

3. Analisis keandalan dilakukan menggunakan metode distribusi *Weibull*.
4. Penelitian ini tidak membahas analisis metalurgi material rantai maupun perhitungan biaya (*cost analysis*) secara mendalam, melainkan fokus pada parameter waktu dan probabilitas kegagalan.

1.7 Sistematika Penulisan Skripsi

Untuk memberikan gambaran yang menyeluruh dan sistematis mengenai penyusunan laporan tugas akhir ini, maka penulisan disusun dengan sistematika sebagai berikut:

BAB I: PENDAHULUAN

Bab ini berisi gambaran umum mengenai dasar pelaksanaan penelitian. Di dalamnya mencakup latar belakang masalah, perumusan masalah, pertanyaan penelitian, tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan masalah, serta sistematika penulisan laporan. Bab ini menjadi landasan mengapa evaluasi keandalan rantai *Submerged Scraper Conveyor* (SSC) perlu dilakukan.

BAB II: TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

Bab ini memaparkan rangkuman studi literatur dari penelitian terdahulu yang relevan (*state of the art*) serta teori-teori dasar yang digunakan sebagai pisau analisis. Materi yang dibahas meliputi prinsip kerja *bottom ash handling system* dan komponen SSC, mekanisme kegagalan material (keausan/korosi), konsep dasar Keandalan (*Reliability*), Manajemen Perawatan (*Maintenance Management*), serta penjabaran matematis mengenai Distribusi *Weibull* dan penentuan parameter-parameternya.

BAB III: METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini menjelaskan tahapan-tahapan sistematis yang dilakukan dalam menyelesaikan penelitian. Penjelasan dimulai dari diagram alir penelitian (*flowchart*), metode pengumpulan data primer dan sekunder (data kerusakan/TTF), identifikasi variabel penelitian, hingga langkah-langkah pengolahan data statistik menggunakan metode *Weibull* untuk mendapatkan nilai keandalan dan interval perawatan.

**Hak Cipta :**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

BAB IV: HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini merupakan inti dari penelitian yang menyajikan hasil pengolahan data dan analisis mendalam. Pembahasan mencakup pengujian distribusi data, perhitungan parameter *Weibull* (*Shape* dan *Scale*), perhitungan nilai *Reliability* dan *Mean Time To Failure* (MTTF), serta penentuan interval perawatan pencegahan yang optimal. Hasil perhitungan kemudian dianalisis untuk memberikan rekomendasi teknis bagi perusahaan.

BAB V: PENUTUP

Bab ini berisi kesimpulan yang menjawab seluruh tujuan penelitian secara ringkas dan padat, serta saran-saran yang konstruktif bagi perusahaan maupun penelitian selanjutnya untuk pengembangan topik yang lebih mendalam.



**POLITEKNIK
NEGERI
JAKARTA**



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

BAB V KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan analisis keandalan rantai *Submerged Scraper Conveyor (SSC)* pada *bottom ash handling system* Unit 2 PLTU PT XYZ menggunakan distribusi *Weibull* dua parameter, diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Parameter distribusi *Weibull* yang merepresentasikan karakteristik kegagalan rantai *Submerged Scraper Conveyor (SSC)* diperoleh sebesar *shape parameter* (β) = 1,1979 dan *scale parameter* (η) = 43,4449 hari. Nilai $\beta > 1$ menunjukkan bahwa rantai SSC berada pada fase *wear-out*, yaitu laju kegagalan meningkat seiring bertambahnya waktu operasi. Model distribusi *Weibull* telah divalidasi melalui uji *Goodness of Fit*, yaitu Kolmogorov–Smirnov ($D = 0,0739 < 0,2027$; $p - value = 0,9515$), Anderson–Darling ($A^2 = 0,344 < 0,757$), serta *Weibull Probability Plot* ($R^2 = 0,9782$). Hasil tersebut menunjukkan bahwa data *Time To Failure* mengikuti distribusi *Weibull* sehingga parameter yang diperoleh valid secara statistik dan layak digunakan sebagai dasar analisis keandalan.
2. Tingkat keandalan (*reliability*) rantai SSC mengalami penurunan dari 89,38% pada hari ke-7 menjadi 65,80% pada hari ke-21 dan 39,34% pada hari ke-41. Nilai *Mean Time To Failure (MTTF)* diperoleh sebesar 40,89 hari, yang sangat dekat dengan rata-rata *Time To Failure (TTF)* aktual sebesar 40,78 hari dengan selisih sekitar 0,11 hari, sehingga menunjukkan bahwa model *Weibull* mampu merepresentasikan karakteristik data kegagalan dengan baik. Berdasarkan teori keandalan (*reliability engineering*), fungsi keandalan $R(t)$ menyatakan probabilitas komponen masih berfungsi hingga waktu tertentu, sehingga semakin kecil nilai $R(t)$, semakin besar peluang terjadinya kegagalan. Oleh karena itu, hasil analisis



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

keandalan pada penelitian ini dinyatakan konsisten dan valid untuk menggambarkan kondisi aktual rantai SSC.

3. Interval *preventive maintenance* yang optimal ditetapkan setiap 21 hari pada target tingkat keandalan sekitar 65%. Penerapan interval tersebut meningkatkan tingkat keandalan saat dilakukan perawatan dari 39,34% menjadi 65,80%, atau meningkat sebesar 26,46%, sehingga berpotensi menurunkan probabilitas terjadinya *breakdown*, mengurangi *downtime*, serta meningkatkan *availability* sistem *bottom ash handling*. Penentuan interval ini didasarkan pada hasil analisis fungsi keandalan distribusi *Weibull* yang telah memenuhi uji kesesuaian distribusi (*Goodness of Fit*), sehingga rekomendasi interval perawatan tersebut memiliki dasar statistik yang valid dan dapat dijadikan acuan dalam penyusunan jadwal *preventive maintenance*.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian, PT XYZ disarankan menerapkan interval *preventive maintenance* rantai *Submerged Scraper Conveyor* (SSC) Unit 2 setiap 21 hari untuk menjaga tingkat keandalan sistem dan mengurangi potensi kegagalan mendadak. Selain itu, perusahaan perlu melakukan pencatatan data *Work Order* secara konsisten dan terstruktur agar mendukung analisis keandalan pada periode berikutnya.

Bagi penelitian selanjutnya, disarankan untuk mengembangkan analisis dengan mempertimbangkan aspek biaya perawatan (*maintenance cost*) serta mengombinasikan distribusi *Weibull* dengan metode lain, seperti *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) atau *Reliability Centered Maintenance* (RCM), sehingga diperoleh rekomendasi strategi perawatan yang lebih komprehensif.



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

DAFTAR PUSTAKA

- Alfionita, S., & Alifin, F. I. (2023). *Preventive Maintenance Analysis Based on Mean Time Between Failure (MTBF) and Mean Time to Repair (MTTR). Angkasa Jurnal Ilmiah Bidang Teknologi*, 15(2), 201–213. <https://doi.org/10.28989/angkasa.v15i2.1833>
- Aslam, M., Safari, M., Masseran, N., Hilmi, M., Majid, A., Ridzuan, R., & Tajuddin, M. (2025). Robust estimation of the three parameter Weibull distribution for addressing outliers in reliability analysis. *Scientific Reports*, 15((1)), 1–14.
- Hakim, A., Pratiwi, A. I., & Prasetyo, A. (2020). Usulan *Preventive Maintenance* dengan Metode *Reliability Centered Maintenance* untuk Meminimalkan Biaya Perawatan Mesin. *Jurnal Industry Xplore Vol.5*, 5(1), 26–33.
- Haryadi, G. D., Siburian, G. E., & Iskandar, N. (2020). Metode Perhitungan Critical Component Lifetime Prediction dan Keandalan Menggunakan *Weibull* pada Coal Hauler Truck. *TRAKSI: Majalah Ilmiah Teknik Mesin*, 20(1), 24–44.
- Ismail, K. M., Suwono, N. I., Al Qorni, U., Iswanto, A. R. P., Friskiana, N. M. S., & Kapisa, Y. A. (2023). Kerusakan Roller pada Conveyor Kedatangan. *Jurnal Teknik Mekanikal Bandar Udara*, 1(3), 152–157.
- James, A. K., Thring, R. W., Helle, S., & Ghuman, H. S. (2012). Ash Management Review—Applications of Biomass *Bottom Ash*. *Energies*, 5, 3856–3873. <https://doi.org/10.3390/en5103856>
- Mujiarto, I., Asmoro, E. I., & Kundori. (2022). Pengukuran Laju Kerusakan dengan Mengindikasikan Nilai MTBF dalam Manajemen Perawatan Mesin pada PT. AIC. *Jurnal Teknik Mesin, Industri, Elektro Dan Informatika (JTMEI)*, 1(3), 14–23.
- Mutiara, S. D., Rahman, A., & Hamdala, I. (2014). Perencanaan *Preventive Maintenance* Komponen Cane Cutter I dengan Pendekatan Age Replacement. *Jurnal Rekayasa Dan Manajemen Sistem Industri*, 2((2)), 396–405.
- Nicola, H. A., Ridwan, E., & Ramdhan Gunadi, G. Gu. (2022). *Analisa Keandalan Chain Submerged Scraper Conveyor pada PLTU Menggunakan Metode RCM di PT . ABC*. 2, 1529–1537.
- Onifade, M., Ismail, A., Oluwaseyi, S., & Khandelwal, M. (2024). Predictive modelling for coal abrasive index : Unveiling influential factors through Shallow and Deep Neural Networks. *Fuel*, 374(July), 132319. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.132319>
- Pamungkas, I., Irawan, H. T., & Pandria, T. M. A. (2021). *IMPLEMENTASI PREVENTIVE MAINTENANCE UNTUK MENINGKATKAN*. 2, 73–79. <https://doi.org/10.38038/vocatech.v2i2.53>
- Risna, & Lutfi, M. (2019). Analisa Perawatan Berbasis Keandalan pada Sistem Bahan Bakar Mesin Utama kapal Motor Penyebrangan Bontoharu. *JST (Jurnal Sains Terapan)*, 5(1), 36–43.
- Riza, F., & Imaduddin, I. R. (2019). Redesain Speed Control *Submerged Scraper Conveyor (SSC) Bottom Ash* Menggunakan AC Drive. *JEECOM*, 1(1), 34–48.
- Setiawan, F., Sofyan, E., & Hadi, M. (2021). Perencanaan Preventive Maintenance Ram Air Actuator pada Pesawat Boeing 737 Next Generation Menggunakan



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

- Metode Reliability Di PT . GMF Aeroasia. *JOURNAL OF APPLIED MECHANICAL ENGINEERING AND RENEWABLE ENERGY (JAMERE)*, 1(2), 53–62.
- Sihotang, A., Nurbanasar, M., Abdurrachim, Sirod, M. P. N., & Mahaputra, S. H. (2020). Metallurgical Analysis of Fatigue Failure in Submerge Chain Conveyor. *International Journal of Engineering Research and Technology (IJERT)*, 11(1), 1–18.
- Subhan, A., Firmansyah, H. N., & Yudiono, H. (2025). Analisis Keandalan Mesin CBF64S Berdasarkan Metode Weibull dan Penentuan Akar Permasalahan Menggunakan Fault Tree Analysis. *Angkasa Jurnal Ilmiah Bidang Teknologi*, 17(2), 214–224. <https://doi.org/10.28989/angkasa.v17i2.2978>
- Tamba, I. A., Margana, A. S., Prasetyo, B. Y., & Kunci, K. (2023). Analisis Manajemen Perawatan Menggunakan Perhitungan Distribusi Weibull Dan Metode Fmea Pada Ac Package Di Gerbong PT . KCI Juanda. *Industrial Research Workshop and National Seminar (IRWNS)*, 14((1)), 235–241.
- Wibowo, H., Sidiq, A., & Ariyanto. (2018). Penjadwalan Perawatan Komponen Kritis dengan Pendekatan Reliability Centered Maintenance (RCM) pada Perusahaan Karet. *Jurnal Ilmiah Teknik Industri* (2018), 6(2), 79–87.
- Yang, F., Ren, H., & Hu, Z. (2019). Maximum Likelihood Estimation for Three-Parameter Weibull Distribution Using Evolutionary Strategy. *Hindawi Mathematical Problems in Engineering*, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/6281781>
- Yusuf, A., Iviana, A., & Aditya, D. (2016). Analisis Keandalan Mechanical Press Shearing Machine di Perusahaan Manufaktur Industri Otomotif. *Kumpulan Jurnal Dan Prosiding Elektronik PPNS*, 324–329.
- Zabihian, F. (2021). *Power Plant Engineering* (1st ed.). CRC Press.

POLITEKNIK
NEGERI
JAKARTA



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

LAMPIRAN

Lampiran 1. Daftar Riwayat Hidup

- | | |
|--------------------------|--|
| 1. Nama Lengkap | : Muhammad Hamdi |
| 2. NIM | : 2202421022 |
| 3. Tempat, Tanggal Lahir | : Jakarta, 6 September 2003 |
| 4. Jenis Kelamin | : Laki – Laki |
| 5. Alamat | : Jl. KEBON JAHE KOBER Gg. III/7A
,Petojo Selatan, Kec.Gambir, DKI Jakarta
10160 |
| 6. Email | : Muhammad.hamdi.tm22@mhsw.pnj.ac.id |
| 7. Pendidikan | |
| SD (2008-2014) | : SDN Petojo Selatan 05 Pagi |
| SMP (2014-2017) | : SMPN 269 Jakarta |
| SMA (2017-2020) | : SMKN 1 Jakarta |
| 8. Program Studi | : Teknologi Rekayasa Pembangkit Energi |
| 9. Bidang Peminatan | : - |
| 10. Tempat/Topik OJT | : PT. Indonesia Power UBP Jabar 2 Palabuhan
Ratu |



**POLITEKNIK
NEGERI
JAKARTA**



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Lampiran 2. Data Historis Kerusakan dan TTF Rantai SSC

No.	Kode Work Order	Tanggal WO	Deskripsi Kegagalan
0	202118168	04 Jan 2021	[Regu B] sambungan pengunci + keluar jalur chain ssc #2 rusak (POD)
1	202112130	20 Jan 2021	Unit 2, chain SSC terpantau mengangkat saat operasi POD
2	202113440	28 Jan 2021	Unit 2, chain SSC anjlok area sprocket atas POD
3	202115972	03 Feb 2021	SSC #2, chain keluar jalur POD
4	202115720	25 Feb 2021	Unit 2, chain SSC terpantau kendur POD
5	202116100	03 Mar 2021	Unit 2, chain SSC terpantau kendur DONE
6	202120121	22 Apr 2021	Unit 2, rantai SSC terpantau kendur POD
7	202122261	18 May 2021	Unit 2, chain SSC terpantau kendur POD
8	202132386	02 Jun 2021	Unit 2, chain SSC terpantau kendur POD
9	202118594	04 Jun 2021	Unit 2, chain SSC terpantau kendur
10	202132962	11 Jun 2021	Unit 2, chain SSC kendur (perlu potong) POD
11	202116482	03 Aug 2021	Unit 2, chain SSC terpantau kendur POD
12	202138708	27 Aug 2021	Unit 2, chain SSC terpantau kendur Done
13	202141453	27 Sep 2021	Unit 2, chain SSC terpantau kendur POD
14	202144134	25 Oct 2021	Unit 2, chain SSC terpantau kendur POD



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

No.	Kode Work Order	Tanggal WO	Deskripsi Kegagalan
15	202149519	20 Dec 2021	Unit 2, chain SSC terpantau kendor (POD)
16	202211198	17 Jan 2022	Rantai SSC unit 2 sisi unit kendor (normal)
17	202216057	16 Mar 2022	Unit 2, chain SSC terpantau kendor (POD)
18	202218842	13 Apr 2022	Unit 2, chain SSC terpantau kendor (POD)
19	202219195	18 Apr 2022	Unit 2, chain SSC terpantau kendor (POD)
20	202220294	09 May 2022	Unit 2, chain SSC terpantau kendor (wdone)
21	202225636	24 Jun 2022	Unit 2, chain SSC terpantau kendor (wdone)
22	202226769	11 Jul 2022	Unit 2, chain SSC terpantau kendor (wdone)
23	202229679	18 Aug 2022	Unit 2, chain SSC terpantau kendor (wdone)
24	202231305	05 Sep 2022	Unit 2, chain SSC terpantau kendor (wdone)
25	202235857	19 Oct 2022	Unit 2, chain SSC terpantau kendor (wdone)
26	202238043	15 Nov 2022	Unit 2, chain SSC terpantau kendor (wdone)
27	JPREPWO00000003	01 Jan 2023	Unit 2, chain SSC terpantau kendor
28	JPREPWO000000097	20 Jan 2023	[Regu B] Chain SSC unit 2 anjlok
29	202319945	13 Apr 2023	Unit 2, chain SSC terpantau kendor (POD)
30	202320274	17 Apr 2023	ssc #2, chain ssc anjlok POD



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

No.	Kode Work Order	Tanggal WO	Deskripsi Kegagalan
31	202325738	06 Jun 2023	Unit 2, chain SSC terpantau kendor (wdone)
32	202328360	03 Jul 2023	Unit 2, chain SSC terpantau kendor (wdone)
33	202336610	04 Oct 2023	Unit 2, chain SSC terpantau kendor (POD)
34	202334527	09 Nov 2023	Unit 2, chain SSC terpantau kendor (wdone)
35	202411347	18 Jan 2024	Unit 2, chain SSC terpantau kendor (POD)
36	202422252	05 Feb 2024	Rantai SSC unit 2 anjlok (INPRG)
37	202437183	10 Feb 2024	Unit 2, chain SSC terpantau kendor (WDONE)
38	202426949	24 Jun 2024	Unit 2, chain SSC terpantau kendor (WPCOND)
39	202431202	02 Aug 2024	Unit 2, chain SSC terpantau kendor minta di potong (POD)
40	202444864	12 Sep 2024	Unit 2, chain SSC terpantau kendor (Wdone)
41	202445810	19 Dec 2024	ssc #2 chain anjlok (WDONE)
42	202539595	17 Feb 2025	Unit 2, chain SSC terpantau kendor (wdone)
43	202542769	26 Mar 2025	Chain SSC Unit 2 keluar jalur (POD)
44	202544186	14 Aug 2025	Unit 2, chain SSC terpantau kendor (POD)
45	202611889	13 Jan 2026	Unit 2, chain SSC terpantau kendor (POD)



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Lampiran 3. Script Python Analisis Keandalan

Program Python ini digunakan untuk:

1. Menghitung nilai-nilai keandalan menggunakan parameter distribusi *Weibull* hasil estimasi metode *Maximum Likelihood Estimation* (MLE), yaitu parameter bentuk $\beta = 1,1979$ dan parameter skala $\eta = 43,4449$ hari.
2. Menghitung nilai keandalan (*Reliability*) $R(t)$.
3. Menghitung laju kegagalan (*Hazard Rate*) $h(t)$.
4. Menghitung *Mean Time To Failure* (MTTF).
5. Menentukan interval *preventive maintenance* (PM) optimal berdasarkan target keandalan.
6. Membuat grafik fungsi keandalan $R(t)$, grafik laju kegagalan $h(t)$, dan grafik penentuan interval *preventive maintenance* optimal.

Estimasi parameter MLE itu sendiri dilakukan terpisah menggunakan Python library `scipy.stats` dengan perintah:

```
from scipy.stats import weibull_min
beta, loc, eta = weibull_min.fit(data_ttf, floc=0)
```

yang menyelesaikan persamaan log-likelihood secara iteratif terhadap 45 data TTF, sebagaimana diuraikan pada subbab 4.3. Skrip di bawah ini menggunakan hasil estimasi tersebut:

```
#
=====
====
# KODE GRAFIK KEANDALAN RANTAI SSC — DISTRIBUSI WEIBULL
# Muhammad Hamdi — NIM 2202421022
# (Versi lengkap: 3 grafik, anti-gagal, tanpa scipy)
#
# Menghasilkan:
# Gambar 4.1 — Kurva Keandalan R(t)
# Gambar 4.2 — Kurva Laju Kegagalan h(t)
# Gambar 4.3 — Kurva Penentuan Interval PM Optimal (21 hari)
#
# Cara jalankan:
# pip install numpy matplotlib
# python kode_grafik LENGKAP.py
#
=====
=====
```



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from math import gamma      # math.gamma bawaan Python (tanpa scipy)

# -----
# 1. PARAMETER WEIBULL (hasil estimasi MLE dari 45 data TTF)
# -----
beta = 1.1979      # parameter bentuk (shape)
eta  = 43.4449     # parameter skala (scale), hari
mttf = eta * gamma(1 + 1/beta)  # = 40,89 hari

# -----
# 2. DATA KURVA (array eksplisit, mulai 0.01, pakai np.power)
# -----
t = np.linspace(0.01, 160, 800)
Rt = np.exp(-np.power(t/eta, beta)) * 100.0      # R(t) dalam %
ht = (beta/eta) * np.power(t/eta, beta - 1.0)    # h(t)

titik = [7, 21, 28, 41]
warna = ['green', 'orange', 'purple', 'blue']
Rtitik = [np.exp(-(tt/eta)**beta) * 100 for tt in titik]

#
=====
=====
# GAMBAR 4.1 — KURVA KEANDALAN R(t)
#
=====
=====
fig, ax = plt.subplots(figsize=(9, 5))
ax.plot(t, Rt, color='green', linewidth=2.5, zorder=3, label='Kurva keandalan R(t)')
ax.axvline(21, color='orange', linewidth=1.8, zorder=2, label='PM optimal (21 hari)')
ax.axvline(41, color='mediumslateblue', linestyle='--', linewidth=1.8, zorder=2, label='MTTF (41 hari)')
for tt, w, rv in zip(titik, warna, Rtitik):
    ax.plot(tt, rv, 'o', color=w, markersize=9, zorder=4, label=f'R({tt} hari) = {rv:.2f}%')
    ax.annotate(f'{rv:.1f}%', (tt, rv), (tt - 4, rv + 4), fontsize=10, fontweight='bold', color=w, zorder=5)
ax.set_xlabel('Waktu operasi t (hari)', fontsize=11)
ax.set_ylabel('Keandalan R(t) (%)', fontsize=11)
ax.set_xlim(0, 160); ax.set_ylim(0, 100)
ax.set_xticks(np.arange(0, 161, 20)); ax.set_yticks(np.arange(0, 101, 20))
```



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

```

ax.grid(True, linestyle=':', alpha=0.6)
ax.legend(loc='upper right', fontsize=9)
plt.tight_layout()
plt.savefig('Gambar_4.1_Kurva_Keandalan_Rt.png',
bbox_inches='tight')

```

dpi=300,

```

#
=====
=====
# GAMBAR 4.2 — KURVA LAJU KEGAGALAN h(t)
#
=====
=====
fig, ax = plt.subplots(figsize=(9, 5))
ax.plot(t, ht, color='crimson', linewidth=2.5, zorder=3)
ax.fill_between(t, ht, color='crimson', alpha=0.10, zorder=1)
ax.set_xlabel('Waktu operasi t (hari)', fontsize=11)
ax.set_ylabel('Laju kegagalan h(t)', fontsize=11)
ax.set_xlim(0, 160); ax.set_ylim(0, 0.037)
ax.set_xticks(np.arange(0, 161, 20))
ax.grid(True, linestyle=':', alpha=0.6)
ax.text(0.97, 0.06, ' $\beta = 1,1979 > 1$  fase wear-out',
transform=ax.transAxes, fontsize=10, ha='right', va='bottom',
bbox=dict(boxstyle='round,pad=0.4', facecolor='mistyrose',
edgecolor='crimson', linewidth=1.5))
plt.tight_layout()
plt.savefig('Gambar_4.2_Kurva_Laju_Kegagalan_ht.png',
bbox_inches='tight')

```

dpi=300,

```

#
=====
=====
# GAMBAR 4.3 — KURVA PENENTUAN PM OPTIMAL 21 HARI
#
=====
=====
fig, ax = plt.subplots(figsize=(9, 5))
ax.plot(t, Rt, color='green', linewidth=2.5, zorder=3, label='Kurva keandalan R(t)')

# titik-titik target keandalan (abu-abu) untuk berbagai R
for R_target in [0.90, 0.85, 0.80, 0.75, 0.70]:
    t_pm = eta * (-np.log(R_target))**(1/beta)
    ax.plot(t_pm, R_target*100, marker='o', color='gray', markersize=5,
zorder=4)

```



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

```
# titik rekomendasi 21 hari (merah, besar)
t_rec = 21
R_rec = np.exp(-(t_rec/eta)**beta) * 100
ax.plot(t_rec, R_rec, marker='o', color='red', markersize=11, zorder=5,
        label=f'Rekomendasi PM: 21 hari (R={R_rec:.1f}%)')

# garis bantu putus-putus merah
ax.plot([t_rec, t_rec], [0, R_rec], color='red', linestyle=':', linewidth=1, zorder=2)
ax.plot([0, t_rec], [R_rec, R_rec], color='red', linestyle=':', linewidth=1,
        zorder=2)

# teks keterangan
ax.text(55, 75, f'PM Optimal\n21 hari\nR = {R_rec:.1f}%',
        fontsize=11, fontweight='bold', color='red')

ax.set_xlabel('Waktu operasi / Interval PM (hari)', fontsize=11)
ax.set_ylabel('Keandalan R(t) (%)', fontsize=11)
ax.set_xlim(0, 160); ax.set_ylim(0, 100)
ax.grid(True, alpha=0.3)
ax.legend(loc='upper right', fontsize=9)
plt.tight_layout()
plt.savefig('Gambar_4.3_Kurva_PM_Optimal.png',
            dpi=300,
            bbox_inches='tight')

plt.show() # tampilkan ketiga grafik

# -----
# 3. CETAK NILAI (untuk verifikasi ke penguji)
# -----
print(f'beta = {beta} ; eta = {eta} hari ; MTTF = {mttf:.2f} hari\n')
print(f'{t':>5} | {R(t)':>8} | {h(t)':>10}')
print("-" * 30)
for tt in titik:
    R = np.exp(-(tt/eta)**beta) * 100
    h = (beta/eta) * (tt/eta)**(beta - 1)
    print(f'{tt:>5} | {R:>7.2f}% | {h:>10.6f}')

print("\nTabel interval PM untuk berbagai target keandalan:")
print(f'{R target':>10} | {t_PM (hari)':>12}')
print("-" * 26)
for R_target in [0.90, 0.85, 0.80, 0.75, 0.70, 0.65]:
    t_pm = eta * (-np.log(R_target))**(1/beta)
    print(f'{R_target*100:>9.0f}% | {t_pm:>12.1f}')
```