

**OPTIMASI *RELIABILITY-BASED PREVENTIVE MAINTENANCE GLAND*
PACKING SOOT BLOWER DENGAN *MIXED INTEGER NONLINEAR*
*PROGRAMMING (MINLP)***

(Studi Kasus: PT Paiton Operation & Maintenance Indonesia Unit 3)

Diajukan kepada Fakultas Sains dan Teknologi

Universitas Islam Negeri Sunan Kalijaga Yogyakarta

Untuk memenuhi persyaratan memperoleh gelar Sarjana Teknik (S.T.)



Disusun oleh:

Nama : Muhammad Naufal Daffa Satria

NIM : 22106060068

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

**PROGRAM STUDI TEKNIK INDUSTRI
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI**

UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SUNAN KALIJAGA

YOGYAKARTA

2026

LEMBAR PENGESAHAN



KEMENTERIAN AGAMA
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SUNAN KALIJAGA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI

Jl. Marsda Adisucipto Telp. (0274) 540971 Fax. (0274) 519739 Yogyakarta 55281

PENGESAHAN TUGAS AKHIR

Nomor : B-1113/Un.02/DST/PP.00.9/06/2026

Tugas Akhir dengan judul : Optimasi Reliability-Based Preventive Maintenance Gland Packing Soot Blower dengan Mixed Integer Nonlinear Programming (MINLP) (Studi Kasus: PT Paiton Operation & Maintenance Indonesia Unit 3)

yang dipersiapkan dan disusun oleh:

Nama : MUHAMMAD NAUFAL DAFFA SATRIA
Nomor Induk Mahasiswa : 22106060068
Telah diujikan pada : Jumat, 22 Mei 2026
Nilai ujian Tugas Akhir : A

dinyatakan telah diterima oleh Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta

TIM UJIAN TUGAS AKHIR



Ketua Sidang
Syaeful Arief, S.T., M.T.
SIGNED

Valid ID: 6a1e6add8b6c6



Penguji I
Ir. Titi Sari, S.T., M.Sc., IPM.
SIGNED

Valid ID: 6a1e66822a974



Penguji II
Ir. Trio Yonathan Teja Kusuma, S.T., M.T.,
IPM., ASEAN Eng
SIGNED

Valid ID: 6a1da7df26abd



Yogyakarta, 22 Mei 2026
UIN Sunan Kalijaga
Dekan Fakultas Sains dan Teknologi
Prof. Dr. Dra. Hj. Khurul Wardati, M.Si.
SIGNED

Valid ID: 6a1e8e18e08ed

SURAT PERSETUJUAN SKRIPSI

SURAT PERSETUJUAN SKRIPSI/TUGAS AKHIR

Hal : Surat Persetujuan Skripsi/Tugas Akhir

Lamp : -

Kepada

Yth. Dekan Fakultas Sains dan Teknologi

UIN Sunan Kalijaga

Di Yogyakarta

Assalamu 'alaikum wr wb

Setelah membaca, meneliti, memberikan petunjuk dan mengoreksi serta mengadakan perbaikan seperlunya, maka kami selaku pembimbing berpendapat bahwa skripsi saudara:

Nama : Muhammad Naufal Daffa Satria

NIM : 22106060068


Judul Skripsi : Optimasi *Reliability-Based Preventive Maintenance Gland Packing Soot Blower* dengan *Mixed Integer Nonlinear Programming (MINLP)* (Studi Kasus: PT Paiton Operation & Maintenance Unit 3)

Sudah dapat diajukan kembali kepada Program Studi Teknik Industri Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta sebagai salah satu syarat memperoleh gelar Sarjana Strata Satu dalam Program Studi Teknik Industri.

Dengan ini kami mengharapkan agar skripsi/tugas akhir saudara tersebut di atas dapat segera dimunaqsyahkan. Atas perhatiannya kami ucapkan terima kasih.

Wassalamu 'alaikum wr wb

Yogyakarta, 8 Mei 2026
Pembimbing,


Syaeful Arifin, S.T., M.T.
NIP. 19870915 202012 1 004

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

SURAT KEASLIAN SKRIPSI

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Muhammad Naufal Daffa Satria.....
NIM : 22106060068.....
Program Studi : Teknik Industri.....
Fakultas : Sains dan Teknologi.....

Menyatakan dengan sesungguhnya, bahwa skripsi saya yang berjudul: **Optimasi Reliability-Based Preventive Maintenance Gland Packing Soot Blower dengan Mixed Integer Nonlinear Programming (MINLP)** (Studi Kasus: PT Paiton Operation & Maintenance Indonesia

Unit 3) adalah hasil karya pribadi dan sepanjang pengetahuan penyusun tidak berisi materi yang dipublikasikan atau ditulis orang lain, kecuali bagian-bagian tertentu yang penyusun ambil sebagai acuan.

Apabila terbukti pernyataan ini tidak benar, maka sepenuhnya menjadi tanggungjawab penyusun.

Yogyakarta, 13 Mei 2026

Yang menyatakan,



Muhammad Naufal Daffa Satria

NIM: 22106060068

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

MOTTO

*“Sesungguhnya Allah tidak akan mengubah keadaan suatu kaum sampai mereka
mengubah keadaan yang ada pada diri mereka sendiri”*

QS. Ar-Ra’d: 11

“In God we trust, all others must bring data”

W. Edwards Deming

*“If you want to find the secrets of the universe, think in terms of energy, frequency
and vibration”*

Nikola Tesla



STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

HALAMAN PERSEMBAHAN

Alhamdulillahirabbil alamin, puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT yang telah memberikan rahmat, karunia, serta hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik dan tepat waktu. Tanpa ridho dan pertolongan-Nya, penulis tidak akan mampu menyelesaikan tugas akhir ini.

Skripsi ini disusun dengan judul "*Optimasi Reliability-Based Preventive Maintenance Gland packing Soot Blower dengan Mixed Integer Nonlinear Programming (MINLP) (Studi Kasus: PT Paiton Operation & Maintenance Indonesia Unit 3)*" sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Industri. Dengan penuh rasa syukur, penulis ingin mempersembahkan serta mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada.

1. Kedua orang tua tercinta beserta keluarga yang senantiasa memberikan doa, dukungan, kasih sayang, serta motivasi yang tiada henti kepada penulis dalam menyelesaikan perkuliahan ini.
2. Ibu Herninanjati Paramawardhani, M.Sc., selaku Ketua Program Studi Teknik Industri yang telah memberikan arahan selama masa perkuliahan.
3. Bapak Dr. Ir. Yandra Rahadian Perdana, ST., MT, selaku dosen pembimbing akademik yang telah memberikan bimbingan dan nasihat selama perkuliahan.
4. Syaeful Arief, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing tugas akhir yang telah memberikan arahan, masukan, serta bimbingan dalam penyusunan skripsi ini dari awal hingga selesai.
5. Seluruh dosen dan staf Program Studi Teknik Industri yang telah memberikan ilmu dan bantuan selama masa perkuliahan.

6. PT Paiton Operation & Maintenance Indonesia, yang telah memberikan kesempatan kepada penulis untuk melakukan penelitian serta membantu dalam pengambilan data.
7. Teman-teman seperjuangan Teknik Industri angkatan 2022 yang telah berjuang bersama dari awal hingga akhir perkuliahan.
8. Sahabat dan teman terdekat yang selalu memberikan dukungan, semangat, serta membantu penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.
9. Seluruh pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu yang telah membantu dalam penyusunan tugas akhir ini.

Semoga segala kebaikan yang telah diberikan kepada penulis mendapatkan balasan dari Allah SWT. Aamiin.



KATA PENGANTAR

Alhamdulillahirabbil alamin, puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas segala rahmat, karunia, dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan judul "*Optimasi Reliability-Based Preventive Maintenance Gland packing Soot Blower dengan Mixed Integer Nonlinear Programming (MINLP) (Studi Kasus: PT Paiton Operation & Maintenance Indonesia Unit 3)*" dengan baik dan tepat waktu.

Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Industri. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat dalam bidang manajemen pemeliharaan berbasis keandalan atau *reliability-based maintenance* serta optimasi penjadwalan pemeliharaan menggunakan pendekatan matematis, khususnya dalam meningkatkan efisiensi biaya dan keandalan sistem produksi.

Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan skripsi ini masih terdapat banyak kekurangan. Oleh karena itu, penulis sangat mengharapkan kritik dan saran yang membangun demi perbaikan di masa yang akan datang.

Akhir kata, penulis berharap semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat dan kontribusi bagi pengembangan ilmu pengetahuan.

Yogyakarta, 6 Mei 2026
Penulis,



Muhammad Naufal Daffa Satria
NIM: 22106060068

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	ii
SURAT PERSETUJUAN SKRIPSI	iii
SURAT KEASLIAN SKRIPSI.....	iv
MOTTO	v
HALAMAN PERSEMBAHAN	vi
KATA PENGANTAR.....	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xiv
ABSTRAK	xv
<i>ABSTRACT</i>	xvi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Pertanyaan Penelitian.....	5
1.3 Tujuan Penelitian	5
1.4 Manfaat Penelitian	6
1.5 Batasan Penelitian.....	7
1.6 Sistematika Penulisan	8
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	10
2.1. Penelitian Terdahulu	10
2.2. Landasan Teori.....	15
2.2.1 <i>Maintenance Management</i>	15

2.2.2 Konsep <i>Reliability-Based Preventive Maintenance</i>	18
2.2.3 Konsep Dasar Keandalan.....	19
2.2.4 Distribusi Probabilitas untuk Analisis Keandalan	23
2.2.5 Model Optimasi MINLP.....	29
BAB III METODE PENELITIAN	39
3.1 Objek Penelitian.....	39
3.2 Metode Pengumpulan Data.....	40
3.2.1 Jenis dan Sumber Data.....	40
3.2.2 Metode Pengumpulan Data.....	41
3.3 Validitas	42
3.4 Variabel Penelitian.....	43
3.5 Model Analisis	46
3.6 Diagram Alir Penelitian	48
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	51
4.1 Gambaran Umum Proses Produksi Perusahaan.....	51
4.2 Hasil Analisis	54
4.2.1 Pengolahan Data <i>Time to Failure</i> (TTF).....	54
4.2.2 Analisis Distribusi <i>Time to Failure</i> (TTF).....	57
4.2.3 Estimasi Parameter Biaya Pemeliharaan	63
4.2.4 Formulasi Model <i>Mixed Integer Nonlinear Programming</i> (MINLP)	67
4.2.5 Implementasi Model pada Perangkat Lunak LINGO.....	69
4.2.6 Hasil Optimasi Model Pemeliharaan	75
4.2.7 <i>Cost Comparison</i>	78
4.3 Pembahasan	80

4.4 Implikasi Manajerial.....	82
BAB V PENUTUP.....	85
5.1 Kesimpulan.....	85
5.2 Saran.....	86
DAFTAR PUSTAKA.....	89
LAMPIRAN.....	L-1



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu.....	10
Tabel 2.2 Klasifikasi Pola Laju Kerusakan	26
Tabel 2.3 Parameter Waktu dan Sistem pada Model Optimasi	34
Tabel 2.4 Parameter Biaya dan Target Model Optimasi	34
Tabel 2.5 Variabel Status Sistem Model Optimasi.....	34
Tabel 2.6 Variabel Keputusan Model Optimasi	35
Tabel 4.1 Histori Perawatan <i>Gland packing</i>	55
Tabel 4.2 <i>Time To Failure</i> (TTF) <i>Gland packing</i>	56
Tabel 4.3 <i>Survival Probabilities</i>	61
Tabel 4.4 Parameter Perhitungan Panjang Material per <i>Layer</i>	65
Tabel 4.5 Atribut Variabel pada Blok SETS.....	70
Tabel 4.6 <i>Input</i> Data pada Model optimasi MINLP.....	70
Tabel 4.7 Jadwal Optimal <i>Maintenance</i> dan <i>Replacement</i> Komponen.....	75
Tabel 4.8 Perbandingan Biaya Pemeliharaan Aktual vs Optimasi LINGO	78

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Kondisi <i>Gland Packing</i> Rusak	2
Gambar 2.1 Hirarki Strategi Pemeliharaan	16
Gambar 2.2 <i>Bathtub Curve</i>	22
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian.....	48
Gambar 4.1 Diagram Proses Produksi Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) .	51
Gambar 4.2 <i>Gland Packing</i> EagleBurgmann Thermoflon SL 6230/SL 9,5 mm ..	54
Gambar 4.3 <i>Goodness of Fit</i>	57
Gambar 4.4 <i>Distribution Overview Plot for TTF</i>	58
Gambar 4.5 <i>Parameter Estimates</i>	59
Gambar 4.6 <i>Characteristics of Distribution</i>	60
Gambar 4.7 Sintaks Himpunan dan Parameter Data pada LINGO.....	71
Gambar 4.8 Sintaks Fungsi Tujuan pada Perangkat Lunak LINGO.....	72
Gambar 4.9 Fungsi Kendala dan Batasan Variabel pada LINGO	74
Gambar 4.10 Status <i>Solver</i> dan Hasil Optimasi LINGO	75
Gambar 4.11 Matriks Penjadwalan Optimal Pemeliharaan	77

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Dokumentasi.....	L-1
Lampiran 2 <i>Script</i> Model Optimasi	L-4
Lampiran 3 Hasil <i>Output Solver</i> LINGO	L-6
Lampiran 4 Sertifikat Kerja Praktik dan Penelitian	L-11



ABSTRAK

Dalam industri pembangkit tenaga listrik, keandalan peralatan adalah kunci kontinuitas operasi. Salah satu komponen kritis pada sistem *soot blower* adalah *gland packing*. Saat ini, kebijakan pemeliharaan *gland packing* di PT Paiton Operation & Maintenance Indonesia Unit 3 masih berbasis interval tetap dan tindakan korektif. Pendekatan ini mengabaikan pola degradasi stokastik komponen sehingga memicu ketidaksesuaian jadwal pemeliharaan, peningkatan frekuensi kegagalan, dan pembengkakan biaya. Penelitian ini bertujuan merancang kebijakan *reliability-based preventive maintenance* untuk menentukan jadwal pemeliharaan optimal menggunakan pendekatan distribusi probabilitas dan *Mixed Integer Nonlinear Programming* (MINLP). Analisis data *Time to Failure* (TTF) menunjukkan distribusi Weibull sebagai model terbaik dengan pola kegagalan meningkat atau *wear-out*. Parameter ini diintegrasikan ke dalam model MINLP guna menentukan keputusan optimal berupa *do nothing*, *maintenance*, atau *replacement* pada setiap interval waktu. Model optimasi ini dibatasi oleh syarat mutlak bahwa komponen dilarang beroperasi jika probabilitas keandalannya menyentuh batas minimal 70% sesuai Standar Industri Indonesia (SII). Hasil penelitian menunjukkan kebijakan *reliability-based preventive maintenance* menghasilkan total biaya pemeliharaan yang lebih rendah sebesar 4,80% atau setara dengan penghematan Rp 441.431 dibanding metode aktual perusahaan. Metode usulan ini berhasil meminimalkan total biaya pemeliharaan serta mencegah *over maintenance* dan *downtime* tak terduga dengan konsisten menjaga performa alat di atas batas keandalan 70%.

Kata Kunci: *Gland packing*, MINLP, Pemeliharaan Preventif Berbasis Keandalan, *Reliability-Based Maintenance*, Weibull.

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

ABSTRACT

In the power generation industry, equipment reliability is the key to operational continuity. One of the critical components in the soot blower system is the gland packing. Currently, the maintenance policy for gland packing at PT Paiton Operation & Maintenance Indonesia Unit 3 is still based on fixed intervals and corrective actions. This approach ignores the stochastic degradation pattern of the components, leading to mismatched maintenance schedules, increased failure frequencies, and cost overruns. This study aims to design a reliability-based preventive maintenance policy to determine the optimal maintenance schedule using a probability distribution approach and Mixed Integer Nonlinear Programming (MINLP). Time to Failure (TTF) data analysis shows the Weibull distribution as the best model with an increasing failure rate or wear-out pattern. These parameters are integrated into the MINLP model to determine optimal decisions namely do nothing, maintenance, or replacement at each time interval. This optimization model is constrained by the absolute requirement that the component is prohibited from operating if its reliability falls below the 70% minimum threshold based on Standar Industri Indonesia (SII). The results indicate that this reliability-based preventive maintenance policy yields lower total maintenance costs by 4.80%, which equals a saving of Rp 441,431 compared to the company's current method. The proposed method successfully minimizes total maintenance costs and prevents over-maintenance and unexpected downtime by consistently maintaining equipment performance above the 70% reliability threshold.

Keywords: Gland packing, MINLP, Preventive Maintenance, Reliability-Based Maintenance, Weibull.

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

BAB I

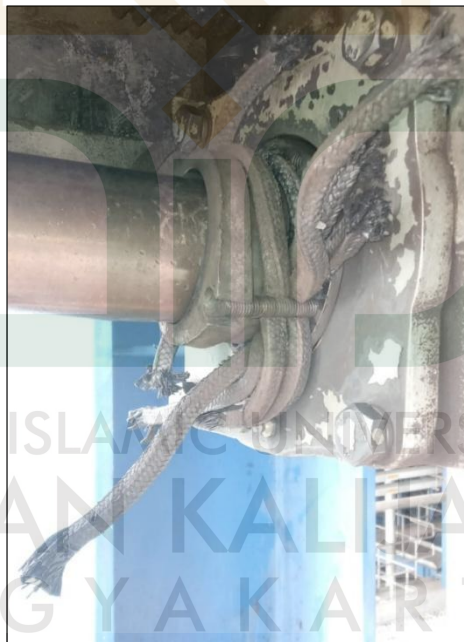
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

PT Paiton Operation & Maintenance Indonesia Unit 3 merupakan salah satu Objek Vital Nasional yang mengoperasikan Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) berbahan bakar batubara dengan kapasitas daya sebesar 815 MW (Ifvournamasari *et al.*, 2022). Pembangkit ini memiliki peran strategis dalam sistem interkoneksi Jawa-Bali karena terhubung langsung pada jaringan transmisi 500 kV yang menjadi tumpuan utama dalam memenuhi kebutuhan beban listrik dan menjaga kestabilan energi (Prahesti *et al.*, 2023). Di dalam sistem PLTU, *boiler* memegang peran sentral dalam proses konversi energi, yaitu mengubah energi kimia dari bahan bakar menjadi energi termal untuk menghasilkan uap bertekanan tinggi yang selanjutnya digunakan untuk memutar turbin dan generator listrik. Oleh karena itu, keandalan *boiler* beserta sistem pendukungnya menjadi faktor yang sangat penting dalam menjaga kontinuitas proses pembangkitan tenaga listrik (Djafar, 2025).

Tantangan utama dalam menjaga performa *boiler* batubara adalah akumulasi deposit abu berupa *slagging* dan *fouling* pada dinding pipa, yang bertindak sebagai isolator panas dan menurunkan efisiensi termal (Utama & Ruhayat, 2024). Untuk menanggulangi hal ini, sistem *soot blower* dioperasikan secara intensif guna merontokkan deposit tersebut dan memulihkan parameter perpindahan panas atau *heat transfer* ke titik optimal (Ramadan, 2025). Namun, tingginya frekuensi pengoperasian aset ini membawa konsekuensi degradasi mekanis pada komponen-komponen kritisnya.

Berdasarkan observasi lapangan yang dilakukan pada sistem *soot blower*, titik kritis yang paling dominan memengaruhi performa dan keselamatan operasi teridentifikasi pada komponen *gland packing*. Komponen dalam rakitan *stuffing box* ini berfungsi sebagai penyekat fleksibel untuk mencegah kebocoran uap saat *lance tube* bergerak dinamis. Namun, kondisi operasi yang melibatkan gesekan berulang dan beban termal tinggi menyebabkan material *packing* mengalami degradasi lebih cepat dari perkiraan. Kegagalan fungsi *gland packing* tidak hanya menimbulkan kerugian energi dan pemborosan air demin akibat kebocoran uap, tetapi juga meningkatkan risiko keselamatan kerja karena paparan uap panas bertekanan tinggi. Kerusakan fisik *gland packing* yang ditemukan pada inspeksi lapangan ditunjukkan pada Gambar 1.1.



Gambar 1.1 Kondisi *Gland Packing* Rusak
Sumber: Dokumentasi (2026)

Pada praktik pemeliharaan eksisting di perusahaan, penanganan *gland packing* berlangsung melalui dua mekanisme utama, yaitu pemeliharaan rutin dua mingguan serta *service request* apabila ditemukan kerusakan di luar jadwal

tersebut. Namun, kebijakan ini masih bersifat umum dan belum menerapkan pendekatan *reliability-based preventive maintenance* yang secara khusus disusun berdasarkan karakteristik degradasi komponen *sealing*. Kondisi ini menyebabkan ketidaksesuaian antara interval pemeliharaan dengan pola kerusakan aktual.

Berdasarkan data historis pemeliharaan *gland packing long retractable soot blower* 2R PT Paiton Operation & Maintenance Indonesia Unit 3 periode September 2025 hingga Februari 2026, tercatat terjadi 8 kali *unexpected failure* yang memicu *Service Request* (SR) di luar jadwal pemeliharaan rutin. Dari total 19 aktivitas pemeliharaan yang tercatat selama periode pengamatan, sebanyak 8 aktivitas berupa SR akibat *unexpected failure*, sehingga sekitar 42% intervensi pemeliharaan masih bersifat reaktif. Bahkan, dalam beberapa kasus, kerusakan terjadi hanya dalam rentang waktu 9 hingga 12 hari setelah perawatan rutin dilakukan. Kegagalan tak terduga ini tidak hanya meningkatkan *downtime* sistem *soot blower*, tetapi juga memicu pembengkakan biaya pemeliharaan akibat kebutuhan material mendadak dan kerugian energi dari kebocoran uap. Menurut Vishnu & Regikumar (2016), kondisi tersebut menunjukkan bahwa ketidaktepatan strategi pemeliharaan dapat memicu pemborosan biaya operasional serta meningkatkan risiko *downtime* pada sistem industri.

Kondisi tersebut menjadi permasalahan penting karena kerusakan *gland packing* dalam praktiknya terbukti terjadi dalam interval yang lebih singkat daripada siklus pemeliharaan dua mingguan perusahaan. Hal ini mempertegas bahwa mekanisme keausan *gland packing* berlangsung progresif dan sulit diprediksi hanya melalui pemantauan visual. Permasalahan utama dalam penelitian ini terletak pada belum tersedianya dasar keputusan objektif untuk menentukan

kapan komponen sebaiknya dipertahankan, dirawat, atau diganti agar tingginya frekuensi kegagalan tak terduga dapat ditekan tanpa mengorbankan keandalan sistem. Dibutuhkan sebuah model yang mampu menyeimbangkan titik temu antara biaya pemeliharaan dan tingkat keandalan yang diharapkan (Changyou *et al.*, 2012).

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, penelitian ini menerapkan pendekatan kuantitatif yang diawali dengan *goodness of fit test* untuk memvalidasi kesesuaian data kerusakan aktual terhadap beberapa kandidat distribusi probabilitas teoretis, yaitu Weibull, normal, lognormal, dan eksponensial. Tahapan ini penting untuk memperoleh fungsi keandalan yang paling merepresentasikan perilaku kegagalan komponen, sebagaimana direkomendasikan dalam studi (Cahyati *et al.*, 2024). Parameter stokastik terpilih kemudian diintegrasikan ke dalam model *Mixed Integer Nonlinear Programming* (MINLP) yang dikembangkan oleh (Moghaddam & Usher, 2010). Model ini dipilih karena mampu mengakomodasi *improvement factor*, sehingga efek perawatan dapat dimodelkan secara lebih realistis sebagai pemulihan yang tidak selalu sempurna dan dapat berubah mengikuti usia komponen. Dalam implementasinya, horison perencanaan dibagi menjadi interval diskrit dengan tiga alternatif keputusan, yaitu melakukan *maintain*, *replace*, atau *do nothing*. Pendekatan optimasi serupa juga didukung oleh penelitian Fithri (2010) yang menunjukkan efektivitas pemrograman matematis dalam meminimalkan biaya operasional pada sistem industri.

Melalui integrasi seleksi distribusi kegagalan dan optimasi MINLP tersebut, penelitian ini bertujuan menghasilkan jadwal pemeliharaan dan penggantian yang presisi bagi komponen *gland packing* pada aset *soot blower* unit 3. Model optimasi

ini secara ketat dibatasi oleh batas minimal keandalan mengacu pada Standar Industri Indonesia (SII) sebesar 70% (Afdal & Linarti, 2023). Jadwal yang dihasilkan diharapkan menjadi dasar penentuan waktu tindakan yang konsisten dan terukur, sehingga risiko kebocoran uap dapat ditekan tanpa memicu pemborosan material. Dengan demikian, keluaran penelitian ini menyeimbangkan efisiensi biaya dan keandalan sistem, sehingga keputusan pemeliharaan yang diambil bersifat objektif, ilmiah, dan dapat dipertanggungjawabkan sebagai acuan operasional di lapangan.

1.2 Pertanyaan Penelitian

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, identifikasi masalah dalam penelitian ini dirumuskan ke dalam beberapa pertanyaan penelitian sebagai berikut.

1. Distribusi probabilitas apa yang paling representatif untuk memodelkan pola kegagalan komponen *gland packing* pada *soot blower* berdasarkan uji *goodness of fit*?
2. Bagaimana perbandingan total biaya pemeliharaan antara metode usulan berbasis MINLP dengan kebijakan aktual perusahaan pada horison perencanaan yang sama?
3. Bagaimana skenario keputusan perawatan optimal antara *do nothing*, *maintenance*, atau *replacement* pada setiap interval mingguan selama horison perencanaan?

1.3 Tujuan Penelitian

Berangkat dari pertanyaan penelitian tersebut, tujuan yang ingin dicapai dalam studi ini adalah sebagai berikut.

1. Menentukan distribusi kegagalan terbaik beserta parameternya melalui uji *goodness of fit* untuk memodelkan karakteristik kegagalan *gland packing*.
2. Membandingkan total biaya pemeliharaan antara metode usulan berbasis MINLP dengan kebijakan aktual perusahaan pada horison perencanaan yang sama.
3. Menghasilkan jadwal keputusan mingguan menggunakan model optimasi *Mixed Integer Nonlinear Programming* (MINLP) dengan tiga opsi tindakan *do nothing*, *maintenance*, dan *replacement*.

1.4 Manfaat Penelitian

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi yang berarti, baik dari segi pengembangan keilmuan maupun aplikasi praktis di sektor industri pembangkitan.

1. Memberikan acuan jadwal tindakan yang terukur untuk menentukan waktu paling tepat melakukan *maintenance* atau *replacement*, sehingga keputusan tidak bergantung pada perkiraan lapangan dan risiko salah *timing* dapat ditekan
2. Menjadi dasar estimasi kebutuhan material *gland packing* dan perencanaan pengadaan yang lebih presisi berbasis probabilitas kegagalan, bukan sekadar rata-rata atau kebiasaan
3. Mengurangi risiko kehilangan energi akibat kebocoran berulang serta memperkuat aspek K3 karena frekuensi kegagalan mendadak dan interaksi teknisi dengan area berbahaya dapat diminimalkan

1.5 Batasan Penelitian

Untuk memastikan pembahasan tetap fokus dan sesuai dengan ketersediaan data, penelitian ini dibatasi oleh beberapa ruang lingkup berikut.

1. Objek penelitian dibatasi pada komponen *gland packing* pada *long retractable soot blower 2R* di PT Paiton Operation & Maintenance Indonesia Unit 3.
2. Data penelitian dibatasi pada data historis kerusakan dan tindakan pemeliharaan *gland packing* pada periode September 2025 sampai Februari 2026, dengan jumlah sebanyak 19 observasi yang mencakup aktivitas *maintenance* dan *service request*. Setelah dilakukan penyaringan berdasarkan definisi kegagalan fungsional, diperoleh 9 titik data *Time to Failure* (TTF). Keterbatasan jumlah data ini berimplikasi pada lebar rentang keyakinan estimasi parameter distribusi, sehingga hasil analisis perlu diinterpretasikan dengan mempertimbangkan batas ketidakpastian yang ada.
3. Horison perencanaan optimasi ditetapkan selama 23 minggu, mengacu pada periode September 2025 sampai Februari 2026 dengan interval keputusan mingguan. Hasil *output* dari optimasi model ini tidak hanya sebatas membandingkan biaya perawatan eksisting dengan model usulan, melainkan berfokus pada penentuan jadwal pemeliharaan dinamis di masa depan. Jadwal ini direpresentasikan dalam bentuk *gantt chart* untuk horizon waktu perencanaan 23 minggu ke depan.
4. Ruang lingkup keputusan dalam model dibatasi pada tiga opsi diskrit *do nothing*, *maintenance*, dan *replacement* tanpa membahas modifikasi desain atau penggantian jenis material.

5. Komponen biaya yang dianalisis dibatasi pada biaya *maintenance*, biaya *replacement*, dan biaya kegagalan *gland packing*. Biaya kegagalan dalam penelitian ini diperlakukan sebagai biaya konsekuensi akibat terjadinya kegagalan komponen, sehingga tidak mencakup biaya operasional lain seperti biaya *overhaul* sistem, biaya tenaga kerja umum, maupun biaya tidak langsung lain di luar parameter model.
6. Kondisi operasi *soot blower* diasumsikan relatif stabil dan kualitas *spare part* diasumsikan seragam tanpa mempertimbangkan cacat produksi.

1.6 Sistematika Penulisan

Guna memberikan gambaran alur pemikiran yang sistematis, naskah skripsi ini disusun ke dalam struktur bab sebagai berikut.

Bab satu Pendahuluan memuat latar belakang tingginya frekuensi kerusakan *gland packing* pada *soot blower*, rumusan masalah, tujuan, manfaat, batasan penelitian, serta sistematika penulisan.

Selanjutnya, bab dua tinjauan pustaka menjelaskan dasar teori pemeliharaan dan keandalan, distribusi probabilitas kegagalan, parameter biaya, serta kajian model optimasi pemeliharaan berbasis *Mixed Integer Nonlinear Programming* (MINLP) mengacu pada Moghaddam dan Usher (2010).

Bab tiga metodologi penelitian menguraikan tahapan penelitian mulai dari identifikasi variabel, pengumpulan data historis kerusakan dan biaya, uji *goodness of fit* untuk pemilihan distribusi kegagalan, hingga formulasi fungsi tujuan dan kendala dalam model MINLP untuk menghasilkan keputusan *do nothing*, *maintenance*, dan *replacement* pada interval perencanaan mingguan.

Kemudian, bab empat hasil dan pembahasan memaparkan proses pengolahan data, analisis penentuan distribusi probabilitas terbaik menggunakan MLE dan uji Anderson-Darling, implementasi model MINLP pada perangkat lunak LINGO, serta analisis hasil optimasi dan perbandingan biaya.

Terakhir, bab lima penutup menyajikan kesimpulan dari keseluruhan hasil penelitian yang menjawab rumusan masalah, beserta saran-saran yang relevan bagi perusahaan maupun pengembangan penelitian selanjutnya.



BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan yang telah dilakukan, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut.

a. Identifikasi Distribusi dan Parameter Kerusakan

Berdasarkan uji *goodness of fit* dengan metode Anderson-Darling, distribusi Weibull terbukti paling representatif dalam memodelkan pola kegagalan komponen *gland packing* dibandingkan distribusi normal, lognormal, dan eksponensial. Distribusi Weibull menghasilkan nilai statistik Anderson-Darling terkecil, dengan $\beta=3,82271$ dan $\eta=18,7376$ hari. Nilai $\beta>1$ mengkonfirmasi bahwa komponen berada pada fase *wear-out* dengan laju kegagalan yang meningkat secara *nonlinier* seiring bertambahnya waktu operasi, konsisten dengan mekanisme degradasi mekanis termal pada *stuffing box soot blower*.

b. Optimasi Biaya Pemeliharaan

Penerapan model optimasi MINLP menghasilkan estimasi total biaya pemeliharaan sebesar Rp 8.746.069 untuk horison perencanaan 23 minggu. Jika dibandingkan dengan biaya aktual perusahaan sebesar Rp 9.187.500, maka metode usulan memberikan penghematan biaya sebesar 4,80% atau senilai Rp 441.431.

c. Usulan Jadwal Pemeliharaan Optimal

Jadwal pemeliharaan optimal yang dihasilkan terdiri dari 16 kali tindakan *maintenance* dan 6 kali tindakan *replacement*. Pola tindakan rutin setiap 2

hingga 3 minggu yang diikuti dengan penggantian komponen pada interval tertentu merupakan implikasi langsung dari nilai β sebesar 3,82 yang mengindikasikan adanya percepatan degradasi *non-linier*. Jadwal ini terbukti mampu mengeliminasi kemungkinan terjadinya kegagalan mendadak selama masa operasional.

5.2 Saran

Berdasarkan keterbatasan dan hasil penelitian yang diperoleh, saran yang dapat diberikan adalah.

a. Saran Bagi Perusahaan

1. Implementasi uji coba jadwal optimasi

Perusahaan disarankan untuk mengimplementasikan jadwal usulan sebagai proyek percontohan selama minimal 23 minggu ke depan. Selama periode ini, perusahaan perlu mencatat setiap kejadian kegagalan dan biaya aktual yang muncul secara detil. Keberhasilan implementasi dapat diukur melalui indikator berkurangnya frekuensi *unexpected failure* hingga mencapai angka nol dan total biaya operasional yang tidak melebihi estimasi model sebesar Rp 8.746.069.

2. Kalibrasi data *improvement factor*

Nilai *improvement factor* sebesar 0,5 saat ini didasarkan pada *expert judgment*. Perusahaan disarankan untuk mendokumentasikan dampak nyata setiap tindakan *maintenance* terhadap umur efektif komponen, sehingga nilai *improvement factor* di masa depan dapat dikalibrasi menggunakan data empiris.

3. Digitalisasi dan integrasi data pemeliharaan

Pengembangan basis data historis yang terintegrasi akan memudahkan pembaruan parameter distribusi secara berkala. Pencatatan rinci mengenai *downtime*, kehilangan produksi, dan aspek keselamatan juga akan sangat membantu dalam memperkuat estimasi *failure cost*.

4. Evaluasi batas keandalan berkala

Perusahaan dapat melakukan analisis sensitivitas terhadap nilai *Required Reliability* (RR) sebesar 0,70 untuk melihat dampaknya terhadap perubahan biaya. Hal ini memungkinkan penyesuaian kebijakan pemeliharaan agar sejalan dengan prioritas produksi dan ketersediaan sumber daya.

b. Saran Bagi Penelitian Selanjutnya

1. Integrasi dengan *Condition-Based Maintenance* (CBM)

Penelitian mendatang dapat menggabungkan model *age-based* ini dengan data *condition monitoring* aktual secara *real-time* seperti pengukuran *gap found*, sehingga model menjadi lebih adaptif dan presisi terhadap degradasi nyata komponen.

2. Pengembangan model multi komponen

Ruang lingkup dapat diperluas dari optimasi komponen tunggal menjadi sistem multi komponen atau penjadwalan simultan untuk beberapa unit *soot blower*, dengan menambahkan kendala keterbatasan sumber daya teknis dan ketersediaan suku cadang.

3. Optimalisasi stokastik

Untuk mengatasi ketidakpastian biaya dan efektivitas tindakan pemeliharaan di lapangan, penelitian selanjutnya dapat menerapkan pendekatan *stochastic programming* atau *robust optimization* agar jadwal yang dihasilkan lebih tahan terhadap fluktuasi kondisi operasional.

4. Penambahan data TTF secara berkelanjutan

Karena penelitian ini hanya menggunakan 9 titik data TTF, parameter distribusi yang dihasilkan masih memiliki ketidakpastian yang cukup besar. Perusahaan disarankan untuk mulai mendokumentasikan setiap kejadian kegagalan secara lebih sistematis ke depannya. Semakin banyak data yang terkumpul, semakin akurat parameter distribusi yang bisa diestimasi, dan pada akhirnya jadwal pemeliharaan yang dihasilkan model pun akan semakin bisa diandalkan.

5. Pengembangan *Decision Support System* (DSS)

Agar model MINLP ini bisa dipakai langsung oleh mekanik atau *planner* di lapangan tanpa harus buka LINGO, algoritma optimasi ini bisa dikembangkan menjadi aplikasi sederhana berbasis web, misalnya menggunakan Python atau diintegrasikan ke dalam sistem CMMS yang sudah ada di perusahaan. Secara fungsional, DSS ini cukup menerima input data *gap found* terbaru, lalu secara otomatis mengeluarkan rekomendasi tindakan mingguan dengan keputusan *do nothing*, *maintenance*, atau *replacement*. Dengan begitu, keputusan pemeliharaan tidak lagi bergantung penuh pada penilaian visual, melainkan ada dasar kalkulasi yang bisa dipertanggungjawabkan.

DAFTAR PUSTAKA

- Afdal, Z. A., & Linarti, U. (2023). Preventive Maintenance Analysis Using Monte Carlo Simulation and Failure Mode and Effect Analysis (FMEA). *Jurnal Ilmiah Teknik Industri*, 22(2). <https://doi.org/10.23917/jiti.v22i2.21900>
- Alhamad, K., Alkhezi, Y., & Alhajri, M. F. (2023). Nonlinear Integer Programming for Solving Preventive Maintenance Scheduling Problem for Cogeneration Plants with Production. *Sustainability*, 15(1). <https://doi.org/10.3390/su15010239>
- Ar-Royyan, D., & Mukhtar, M. N. A. (2023). *Perencanaan Preventive Maintenance Lini Produksi dengan Metode RCM (Reliability Centered Maintenance) di PT Raya*. <https://doi.org/10.33373/profis.v11i1.5081>
- Cahyati, S., Puspa, S. D., Himawan, R., Agtirey, N. R., & Leo, J. A. (2024). Optimization of Preventive Maintenance on Critical Machines at the Sabiz 1 Plant Using the Reliability-Centered Maintenance Method. *Sinergi (Indonesia)*, 28(2), 355–368. <https://doi.org/10.22441/sinergi.2024.2.015>
- Changyou, L., Yimin, Z., & Minqiang, X. (2012). Reliability-based Maintenance Optimization under Imperfect Predictive Maintenance. *Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition)*, 25(1), 160–165. <https://doi.org/10.3901/CJME.2012.01.160>
- Dinis, D. (2025). Maintenance Management: A Review on Problems and Solutions. *Procedia Computer Science*, 253, 3069–3077. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2025.02.031>
- Djafar, R. (2025). *Analisis Termal pada Boiler PLTU XYZ Menggunakan Metode Langsung Berdasarkan Data Operasi Harian* (Vol. 10, Number 1). <https://doi.org/10.30869/jtpg.v10i1.1466>
- Elsayed, E. A. (2021). *Reliability Engineering* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
- Erbiyik, H. (2022). *Definition of Maintenance and Maintenance Types with Due Care on Preventive Maintenance*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.106346>
- Ferdinand, F. A., Haryadi, G. D., & Iskandar, N. (2023). Analisis Keandalan Komponen Kritis Menggunakan Metode Weibull dan Fault Tree Analysis pada Hydraulic Axial Pump Berkapasitas 350 LPS. In *Jurnal Teknik Mesin S-1* (Vol. 11, Number 1). <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/jtm/article/view/37740>
- Fithri, P. (2010). *Optimasi Preventive Maintenance dan Penjadwalan Penggantian Komponen Mesin Kompresor dengan Menggunakan Mixed Integer Nonlinear Programming dari Kamran* [Tesis, Universitas Indonesia]. <https://lib.ui.ac.id/detail?id=20301528&lokasi=lokal>
- Hamasha, M. M., Bani-Irshid, A. H., Al Mashaqbeh, S., Shwaheen, G., Al Qadri, L., Shbool, M., Muathen, D., Ababneh, M., Harfoush, S., Albedoor, Q., & Al-Bashir, A. (2023). Strategical Selection of Maintenance Type Under Different Conditions. *Scientific Reports*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-42751-5>

- Hugo, K., Doaly, C., & Surjasa, D. (2018). *Optimasi Biaya Penjadwalan Penggantian Komponen serta Preventive Maintenance menggunakan Mixed Integer Nonlinear Programming dan Simulasi Monte Carlo pada PT XYZ*. 26–28. <https://repository.untar.ac.id/id/eprint/13816>
- Ifvournamasari, A. D., Sukmawanta, S. N. M., Maryanty, Y., & Yulianto, E. (2022). Perhitungan Efisiensi High Pressure Heater pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap PT POMI Unit 3. *DISTILAT: Jurnal Teknologi Separasi*, 8(2), 308–314. <https://doi.org/10.33795/distilat.v8i2.373>
- Laio, F. (2004). Cramer-von Mises and Anderson-Darling Goodness of Fit Tests for Extreme Value Distributions with Unknown Parameters. *Water Resources Research*, 40(9). <https://doi.org/10.1029/2004WR003204>
- Moghaddam, K. S., & Usher, J. S. (2010). Optimal Preventive Maintenance and Replacement Schedules with Variable Improvement Factor. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 16(3), 271–287. <https://doi.org/10.1108/13552511011072916>
- Muhiu, S., Wakiru, J. M., & Muchiri, P. N. (2025). Reliability-Based Preventive Maintenance Scheduling of a Multi-unit Injection Molding System: A Case Study. *International Journal of Industrial Engineering and Management*, 16(1), 24–39. <https://doi.org/10.24867/IJIEM-368>
- Pereira, F. H., Melani, A. H. de A., Kashiwagi, F. N., Rosa, T. G. da, Santos, U. S. dos, & Souza, G. F. M. de. (2023). Imperfect Preventive Maintenance Optimization with Variable Age Reduction Factor and Independent Intervention Level. *Applied Sciences*, 13(18). <https://doi.org/10.3390/app131810210>
- Prahesti, F. E., Indrawati, E. M., Delfianti, R., & Ukhti, V. A. (2023). Protection Coordination Analysis Study Considering the Arc Flash in the Electrical System of PLTU Paiton Unit III Using IEEE Standard 1584-2002. *Jurnal Edukasi Elektro*, 7(2). <https://journal.uny.ac.id/index.php/jee/article/view/64647>
- Putra, C. D., Viridyawan, V., Rachmilda, T. D., & Suweca, I. W. (2025). Usulan Kebijakan Pemeriksaan pada Gardu Traksi LRT Palembang Berdasarkan Analisis Nilai Keandalan dan Ketersediaan. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 16(1), 179–196. <https://doi.org/10.21776/d5cyfh09>
- Ramadan, M. (2025). *Analisa Pengaruh Soot Blower Pada Sistem Economizer Terhadap Efisiensi Boiler Unit 03 di PT. Bintang Alumina Indonesia* [Politeknik Negeri Batam]. <https://repository.polibatam.ac.id/handle/PL029/4195>
- Setiowulandari, S. S. D., Setiawan, H., & Ardianto, H. (2022). Analisis Windshield Pesawat Boeing 737-NG terhadap Kegagalan dengan Menggunakan Failure Mode and Effect Analysis dan Weibull. *Teknika STTKD: Jurnal Teknik, Elektronik, Engine*, 8(2), 330–341. <https://doi.org/10.56521/teknika.v8i2.674>
- Utama, T. Y., & Ruhyat, N. (2024). Analysis of Boiler Efficiency and NPHR With the Use of Sootblower in a 315 MW Coal-fired Power Plant. *SINTEK*

JURNAL: Jurnal Ilmiah Teknik Mesin, 18(2), 80–89.
<https://doi.org/10.24853/sintek.18.2.80-89>

Vishnu, C. R., & Regikumar, V. (2016). Reliability Based Maintenance Strategy Selection in Process Plants: A Case Study. *Procedia Technology, 25*, 1080–1087. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2016.08.211>

