
Academia Open



By Universitas Muhammadiyah Sidoarjo

Table Of Contents

Journal Cover	1
Author[s] Statement.....	3
Editorial Team	4
Article information	5
Check this article update (crossmark)	5
Check this article impact	5
Cite this article.....	5
Title page.....	6
Article Title	6
Author information	6
Abstract	6
Article content	8

Originality Statement

The author[s] declare that this article is their own work and to the best of their knowledge it contains no materials previously published or written by another person, or substantial proportions of material which have been accepted for the published of any other published materials, except where due acknowledgement is made in the article. Any contribution made to the research by others, with whom author[s] have work, is explicitly acknowledged in the article.

Conflict of Interest Statement

The author[s] declare that this article was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest.

Copyright Statement

Copyright © Author(s). This article is published under the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) licence. Anyone may reproduce, distribute, translate and create derivative works of this article (for both commercial and non-commercial purposes), subject to full attribution to the original publication and authors. The full terms of this licence may be seen at <http://creativecommons.org/licences/by/4.0/legalcode>

Academia Open

Vol. 11 No. 2 (2026): December
DOI: 10.21070/acopen.11.2026.14890

EDITORIAL TEAM

Editor in Chief

Mochammad Tanzil Multazam, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

Managing Editor

Bobur Sobirov, Samarkand Institute of Economics and Service, Uzbekistan

Editors

Fika Megawati, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

Mahardika Darmawan Kusuma Wardana, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

Wiwit Wahyu Wijayanti, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

Farkhod Abdurakhmonov, Silk Road International Tourism University, Uzbekistan

Dr. Hindarto, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

Evi Rinata, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

M Faisal Amir, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

Dr. Hana Catur Wahyuni, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

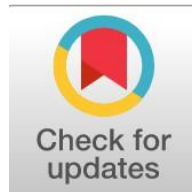
Complete list of editorial team ([link](#))

Complete list of indexing services for this journal ([link](#))

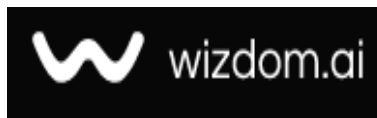
How to submit to this journal ([link](#))

Article information

Check this article update (crossmark)



Check this article impact (*)



Save this article to Mendeley



(*) Time for indexing process is various, depends on indexing database platform

Age Replacement Scheduling Lowers Granulation Machine Downtime: Penjadwalan Penggantian Berdasarkan Usia Mengurangi Waktu Henti Mesin Granulasi

Fajar Rizky, fajar42rizky@gmail.com (*)

Program Studi Teknik Industri, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur, Indonesia

Joumil Aidil Saifuddin Zuhri S, joumilaidil.ti@upnjatim.ac.id

Program Studi Teknik Industri, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur, Indonesia

(*) Corresponding author

Abstract

General Background The fertilizer industry plays a strategic role in supporting national food security and global agriculture, necessitating highly dependable production systems. **Specific Background** PT XYZ operates continuous granular fertilizer production, relying heavily on reactive repair strategies. This approach resulted in 29 breakdowns of the Compact Granulation Double Roller in 2025, specifically affecting the non-repairable seal and bearing, causing 4,167 minutes of operational stoppage. **Knowledge Gap** Previous studies predominantly utilize Mean Time Between Failure, which is inaccurate for non-repairable parts. Additionally, prior Age Replacement research rarely integrates substitution schedules with early-detection inspection timelines. **Aims** This research determines optimal replacement and inspection intervals for critical non-repairable parts utilizing the Age Replacement method. **Results** Time to Failure and Time to Repair data follow a Weibull distribution with a p-value of 0.250. The seal exhibits a Mean Time To Failure of 45,021.76 minutes and a Mean Time To Repair of 210.94 minutes, whereas the bearing records 56,128.87 and 166.41 minutes, respectively. The calculated optimal replacement intervals are 44 days for the seal and 52 days for the bearing. Furthermore, inspection intervals are established at 14 days for the seal and 17 days for the bearing. Implementing this proposed timeline reduces total breakdown duration from 4,167 minutes to 1,644 minutes. **Novelty** The study establishes a dual-interval framework that combines failure-distribution calculations with systematic inspection schedules for non-repairable continuous production parts. **Implications** Adopting this structured schedule minimizes unexpected breakdowns and sustains continuous operational stability in the industrial sector.

Highlights:

- ♦ The Age Replacement method optimizes substitution intervals for non-repairable seals and bearings.
- ♦ Weibull distribution analysis establishes specific inspection timelines to detect early failure indications.
- ♦ Implementing the dual-interval framework decreases total operational stoppage from 4,167 to 1,644 minutes.

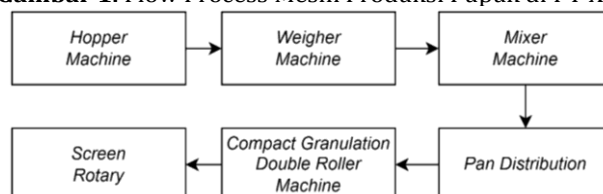
Keywords: AgeReplacement,ContinuousProduction,CorrectiveMaintenance,DowntimeReduction, Weibull Distribution

I. Pendahuluan

Industri pupuk merupakan salah satu sektor manufaktur strategis yang berperan penting dalam mendukung ketahanan pangan nasional dan keberlanjutan sektor pertanian. Produksi pangan global sangat bergantung pada ketersediaan pupuk, khususnya pupuk berbasis nitrogen, yang diketahui menopang sebagian besar hasil pertanian dunia sehingga stabilitas pasokan pupuk menjadi faktor krusial dalam sistem pangan. Ketersediaan pupuk yang berkualitas dan tepat waktu sangat dipengaruhi oleh keandalan sistem produksi. Mengingat industri pupuk memiliki sistem proses yang rumit, membutuhkan konsumsi energi yang tinggi, serta memiliki tingkat kerentanan terhadap gangguan operasional dan fluktuasi dalam rantai pasok [1]. Oleh karena itu, perusahaan pupuk dituntut untuk mengoperasikan sistem produksi yang efisien dan memiliki tingkat keandalan tinggi guna mengurangi frekuensi dan durasi downtime, menjaga keseragaman spesifikasi produk, serta menjamin kesinambungan bagi kebutuhan pertanian [2].

PT XYZ merupakan perusahaan di bidang industri pupuk yang menjalankan sistem produksi berbasis mesin dan beroperasi secara kontinu. Jenis pupuk yang diproduksi adalah pupuk granul dengan menyediakan unsur hara penting seperti nitrogen (N), fosfor (P), dan kalium (K) yang dibutuhkan tanaman dalam menunjang pertumbuhan dan meningkatkan hasil panen. Pupuk granul memiliki daya tahan yang baik terhadap proses penyimpanan dan distribusi karena tidak mudah rusak ataupun menggumpal. Oleh sebab itu, pupuk granul banyak dimanfaatkan dalam sektor pertanian modern karena memiliki ukuran partikel yang lebih seragam, mudah diaplikasikan, serta mampu meningkatkan efisiensi penyerapan unsur hara oleh tanaman. Selain itu, pupuk granul dinilai mampu melepaskan unsur hara secara bertahap sehingga kebutuhan nutrisi tanaman dapat terpenuhi dengan lebih efektif dan berkelanjutan [3].

Gambar 1. Flow Process Mesin Produksi Pupuk di PT XYZ



Berdasarkan pada Gambar 1 dijelaskan bahwa alur proses produksi diawali dengan kedatangan bahan baku masuk ke Hopper Machine sebagai penampungan sementara, material kemudian dialirkan ke Weighing Machine untuk ditimbang sesuai formulasi yang ditetapkan dan dilanjutkan ke Mixer Machine untuk proses pencampuran hingga mencapai homogenitas yang diinginkan. Setelah itu, material diarahkan menuju Pan Distribution untuk mengatur dan meratakan distribusi bahan sebelum tahap pembentukan. Berikutnya, material diproses pada Compact Granulation Double Roller Machine melalui proses pressing agar terbentuk ukuran granul sesuai standar perusahaan. Kemudian tahap akhir dilakukan menggunakan mesin Screen Rotary, yaitu penyaringan berdasarkan ukuran partikel untuk memastikan produk memenuhi spesifikasi.

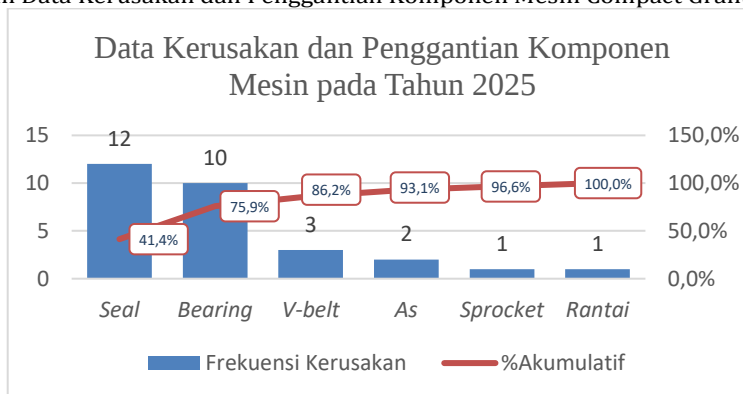
PT XYZ memiliki peranan penting dalam menjaga kelancaran operasional produksi agar proses produksi dapat berjalan secara optimal serta memastikan kondisi mesin dalam keadaan baik. Namun, sistem perawatan mesin yang diterapkan pihak manajemen bersifat corrective maintenance, yaitu perawatan yang dilakukan setelah mesin mengalami kerusakan atau berada dalam kondisi kritis. Kegagalan yang terjadi secara tiba-tiba dapat mengakibatkan terhentinya proses produksi, penurunan kapasitas output, serta terganggunya jadwal operasional perusahaan. Selain itu, kondisi ini dapat memicu kebutuhan perbaikan yang bersifat darurat atau sulit diprediksi, sehingga menimbulkan waktu downtime yang lebih lama dan pemeliharaan menjadi kurang terkendali. Salah satu tahapan yang paling krusial adalah proses granulasi, karena menentukan kualitas bentuk dan ukuran butiran pupuk yang dihasilkan. Proses granulasi pada produksi pupuk urea dengan kapasitas 3.500 ton/hari menghasilkan produk on-size sebesar 98,50% pada rentang ukuran partikel 2–4,75 mm, sehingga menunjukkan bahwa performa granulator sangat memengaruhi kualitas granul, efisiensi proses, serta kestabilan lini produksi pupuk secara keseluruhan [3]. Oleh sebab itu, mesin dengan jenis compact granulation double roller berperan penting karena sangat memengaruhi konsistensi hasil granulasi dan keberlanjutan lini produksi.

Tabel 1. Data Kerusakan dan Perbaikan Komponen Mesin Compact Granulation Double Roller

No	Tanggal	Komponen	Downtime (Menit)
1	06/01/2025	Seal	309
2	08/01/2025	Bearing	74
3	25/01/2025	Bearing	182
4	12/02/2025	Seal	140
5	20/02/2025	V-belt	132
6	06/03/2025	Seal	65
7	14/03/2025	Bearing	260
8	19/03/2025	Seal	200
9	08/04/2025	As	165
10	19/04/2025	Seal	346

No	Tanggal	Komponen	Downtime (Menit)
11	06/05/2025	V-belt	116
12	10/05/2025	Bearing	144
13	07/06/2025	Seal	180
14	18/06/2025	Bearing	96
15	12/07/2025	Seal	120
16	15/07/2025	Bearing	158
17	26/07/2025	Rantai	158
18	01/08/2025	Seal	245
19	20/08/2025	Bearing	245
20	30/08/2025	Seal	350
21	11/09/2025	V-belt	110
22	17/10/2025	Bearing	167
23	17/10/2025	Seal	106
24	04/11/2025	As	285
25	19/11/2025	Seal	195
26	20/11/2025	Bearing	124
27	07/12/2025	Sprocket	202
28	15/12/2025	Seal	253
29	24/12/2025	Bearing	208

Gambar 2. Diagram Data Kerusakan dan Penggantian Komponen Mesin Compact Granulation Double Roller



Tabel 1 menyajikan data kerusakan dan perbaikan komponen mesin, sedangkan Gambar 2 menampilkan diagram yang menggambarkan data kerusakan dan perbaikan komponen pada mesin compact granulation double roller tersebut. Data tersebut menjelaskan bahwa komponen-komponen yang mengalami kegagalan pada mesin compact granulation double roller, dengan frekuensi kegagalan tertinggi tercatat sebanyak 29 kali. Penyebab utama kegagalan yang terjadi pada mesin compact granulation double roller ini adalah komponen seal dan bearing. Seal berfungsi sebagai pelindung untuk mencegah terjadinya kebocoran oli atau grease, komponen ini menghambat masuknya debu, kotoran, dan partikel asing ke dalam komponen mesin. Sedangkan, bearing berfungsi untuk menopang poros agar dapat berputar secara halus dan stabil dengan tingkat gesekan yang rendah, komponen ini berperan menahan beban kerja poros selama mesin beroperasi, sehingga dapat mendukung kinerja mesin secara optimal. Komponen-komponen tersebut termasuk jenis komponen non-repairable karena umumnya mengalami keausan selama penggunaan sehingga harus diganti dengan komponen baru untuk menjaga keandalan mesin dan kelancaran proses produksi [4]. Maka dari itu, perlu tindakan analisis preventive maintenance untuk mengurangi risiko kerusakan mendadak serta mengetahui umur penggantian komponen tertentu secara sistematis dan berbasis keandalan.

Beberapa penelitian terdahulu telah membahas penentuan interval preventive maintenance untuk meningkatkan availability dan mengurangi downtime mesin. Penelitian tersebut berfokus pada penjadwalan preventive maintenance berbasis interval Mean Time Between Failure (MTBF) tanpa mempertimbangkan pola distribusi kerusakan komponen secara detail untuk penentuan interval penggantian komponen. Selain itu, pendekatan MTBF lebih sesuai digunakan pada komponen yang bersifat repairable atau dapat diperbaiki[5]. Pendekatan ini pada dasarnya lebih tepat diterapkan pada komponen repairable, karena MTBF mengasumsikan komponen dapat diperbaiki dan dikembalikan ke kondisi operasionalnya, bukan diganti secara permanen. Ketika pendekatan yang sama diterapkan pada komponen non-repairable, interval penggantian yang dihasilkan berpotensi kurang akurat karena tidak mencerminkan karakteristik laju kerusakan (failure rate) komponen yang sebenarnya. Kondisi ini menunjukkan adanya kesenjangan antara metode yang umum digunakan dengan karakteristik komponen non-repairable yang menjadi objek penelitian ini, sehingga dibutuhkan pendekatan Mean Time To Failure (MTTF)

[ISSN 2714-7444 \(online\), https://doi.org/10.21070/acopen.11.2026.14890](https://doi.org/10.21070/acopen.11.2026.14890), published by Universitas Muhammadiyah Sidoarjo

dan Mean Time To Repair (MTTR) yang dihitung berdasarkan pola distribusi kerusakan masing-masing komponen.

Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, penentuan umur penggantian pada kebijakan metode age replacement banyak digunakan pada penelitian-penelitian sebelumnya karena mampu menentukan umur penggantian komponen yang menekan risiko gangguan mendadak tanpa menyebabkan penggantian dilakukan terlalu sering [6]. Menurut peneliti terdahulu, bahwa menunjukkan age replacement membantu perusahaan menyusun interval penggantian yang lebih optimal sehingga aktivitas pemeliharaan dapat direncanakan dan downtime diminimalkan. [7]. Maka dari itu, metode age replacement dipilih karena mampu menentukan waktu penggantian komponen secara optimal berdasarkan umur pakai komponen sehingga risiko kerusakan mendadak, downtime, dan kegagalan selama proses produksi dapat diminimalkan secara lebih sistematis dan berbasis keandalan [8]. Terlepas dari berbagai penelitian yang telah dilakukan, penerapan metode tersebut masih didominasi oleh studi kasus di industri manufaktur secara umum dan belum banyak dikaji pada mesin produksi di industri pupuk yang beroperasi secara kontinu dengan tingkat kekritisan komponen yang tinggi, seperti mesin Compact Granulation Double Roller. Selain itu, penelitian-penelitian tersebut umumnya hanya berfokus pada penentuan interval waktu penggantian komponen, tanpa mengintegrasikan penentuan interval waktu pemeriksaan (inspection interval) sebagai upaya untuk mendeteksi indikasi awal terjadinya kegagalan sebelum komponen mengalami kerusakan secara umur pakai.

Berdasarkan permasalahan di atas, penelitian ini berfokus pada penentuan interval waktu penggantian komponen mesin dengan menggunakan metode age replacement dengan mempertimbangkan pola distribusi kerusakan komponen agar keputusan penggantian dapat ditetapkan secara sistematis dan berbasis keandalan. Selain itu, penelitian ini juga dilakukan perhitungan nilai Mean Time To Repair (MTTR) dan Mean Time To Failure (MTTF) berdasarkan pola distribusi kerusakan komponen sehingga dapat menjadi acuan penting dalam menentukan interval penggantian komponen yang optimal. Diharapkan hasil penelitian ini dapat menjadi dasar pengambilan keputusan pemeliharaan yang lebih terstruktur, terencana dan dapat meminimalkan downtime khususnya pada umur pakai komponen mesin Compact Granulation Double Roller di PT XYZ.

II. Metode

A. Metode Pengumpulan Data

Metode pengumpulan data digunakan untuk mengumpulkan data dan informasi yang dibutuhkan selama penelitian dalam memecahkan masalah yang akan diteliti. Pengumpulan data dilakukan dengan beberapa teknik sebagai berikut:

1. Studi Literatur

Studi literatur merupakan metode pengumpulan data dengan menelaah berbagai sumber pustaka yang relevan dengan permasalahan penelitian. Sumber tersebut berupa referensi – referensi yang dapat digunakan sebagai landasan teori serta memperkuat hasil penelitian.

2. Studi Lapangan

Studi lapangan adalah metode pengumpulan data melalui survei langsung ke lokasi penelitian atau perusahaan dengan tujuan mengidentifikasi kondisi aktual dan permasalahan yang terjadi. Teknik yang digunakan dalam studi lapangan meliputi:

a. Wawancara : Teknik yang dilakukan dengan cara melakukan komunikasi secara langsung dengan karyawan atau operator yang berkaitan dengan objek penelitian untuk memperoleh informasi yang dibutuhkan.

b. Observasi : Mengamati secara langsung dan mencatat arsip-arsip atau dokumen perusahaan atas segala sesuatu yang berhubungan dengan data-data yang diperlukan.

Data yang dibutuhkan dalam penelitian ini meliputi :

1. Data mesin, komponen mesin
2. Downtime sebelum penggantian komponen
3. Interval waktu kerusakan
4. Frekuensi kerusakan

B. Identifikasi Variabel

Identifikasi variabel sebagai faktor yang mempunyai besaran dan variasi dalam penelitian. Jenis variabel dalam penelitian terdapat dua di antaranya :

1. Variabel Terikat

Variabel terikat adalah variabel yang dipengaruhi atau yang menjadi akibat karena adanya variabel bebas. Dalam penelitian ini, variabel terikat adalah waktu penggantian dan pemeriksaan komponen kritis serta downtime akibat penggantian komponen kritis.

2. Variabel Bebas

Variabel bebas adalah variabel yang mempengaruhi variansi perubahan nilai variabel terikat. Variabel yang diteliti terdiri dari atribut-atribut yang mempengaruhi interval waktu perawatan pada mesin Compact Granulation Double Roller :

- a. Data mesin, komponen mesin
- b. Downtime sebelum penggantian komponen
- c. Waktu antar kegagalan mesin

C. Flowchart

Adapun penjelasan mengenai langkah-langkah penelitian dan pemecahan masalah sebagai berikut:

1. Identifikasi Masalah : Bagian ini merupakan tahap awal penelitian yang bertujuan untuk mengidentifikasi serta mendefinisikan permasalahan secara jelas agar dapat dianalisis secara terukur.
2. Tinjauan Pustaka dan Studi Lapangan : Pengumpulan data teoritis dasar yang digunakan sebagai panduan dalam menganalisis objek penelitian dapat diperoleh dari berbagai literatur dan studi lapangan untuk memperoleh data sebagai bahan pengolahan dan analisis data.
3. Perumusan Masalah : Dalam proses produksi, mesin mengalami kegagalan atau kerusakan yang menyebabkan mesin berhenti beroperasi. Oleh karena itu, diperlukan sistem perawatan yang tepat untuk meminimalkan gangguan operasional perusahaan, salah satunya melalui penerapan metode Age Replacement.
4. Tujuan Penelitian : Penelitian ini bertujuan untuk menentukan interval penggantian dan pemeriksaan komponen kritis pada mesin dengan menggunakan metode Age Replacement.
5. Identifikasi Variabel : Setelah rumusan masalah dan tujuan penelitian ditetapkan, dilakukan penentuan variabel-variabel yang berkaitan dan berpengaruh terhadap permasalahan penelitian.
6. Pengumpulan Data : Peneliti mengumpulkan data dan informasi yang diperlukan perusahaan untuk memecahkan masalah. Data tersebut meliputi Data mesin dan komponen kritis pada mesin, Downtime sebelum penggantian komponen, dan Waktu antar kerusakan. Selanjutnya dilakukan perhitungan nilai time to failure (TTF) dan time to repair (TTR) komponen kritis.
7. Pengolahan Data : Proses pengolahan data dilakukan dengan beberapa tahapan yang meliputi identifikasi pola distribusi, menentukan goodness of fit test, perhitungan mean time to failure (MTTF) dan mean time to repair (MTTR), menentukan jadwal preventive maintenance dengan metode age replacement, perhitungan downtime setelah penggantian komponen dan perhitungan interval waktu pemeriksaan komponen.
8. Identifikasi Pola Distribusi : Penentuan pola distribusi kerusakan dilakukan dengan menghitung nilai Index of Fit terhadap data time to failure (TTF) dan time to repair (TTR). Proses ini menggunakan beberapa kandidat distribusi, yaitu weibull, eksponensial, normal, dan lognormal. Distribusi yang paling sesuai ditentukan berdasarkan nilai parameter uji Index of Fit dengan mengetahui nilai Anderson Darling (AD) terkecil dan nilai Correlation Coefficient (CC) yang mendekati 1 [9].
9. Uji Kesesuaian Distribusi (Goodness of Fit) : Uji kesesuaian distribusi dilakukan untuk memverifikasi kecocokan data terhadap distribusi terpilih dengan berdasarkan nilai parameter uji Goodness of fit. Distribusi dinyatakan sesuai apabila nilai $p \text{ value} \geq 0,05$. Apabila distribusi tersebut tidak sesuai, maka pengujian dilakukan kembali menggunakan kandidat distribusi dengan nilai r terbesar berikutnya hingga diperoleh distribusi yang paling sesuai [10].
10. Penentuan Distribusi Kerusakan dan Parameter dari Distribusi Terpilih : Pada tahap ini dilakukan pemilihan distribusi kerusakan yang paling sesuai serta penentuan parameter dari distribusi yang terpilih sebagai dasar perhitungan analisis keandalan dalam proses penentuan interval waktu penggantian komponen yang optimal [10]. Berdasarkan hasil pengujian, distribusi weibull dipilih karena menghasilkan nilai Index of Fit tertinggi dibandingkan distribusi lain untuk komponen seal dan bearing, sehingga sesuai untuk memodelkan karakteristik kerusakan komponen non-repairable pada penelitian ini.
11. Perhitungan MTTF (Mean Time To Failure) dan MTTR (Mean Time To Repair) : Pada tahap ini dilakukan perhitungan MTTF dan MTTR dengan mengolah data waktu antar kerusakan dan data waktu antar penggantian yang telah dikumpulkan [11].
12. Penentuan jadwal Preventive Maintenance dengan Metode Age Replacement : Selanjutnya, dilakukan perhitungan untuk menentukan interval waktu pemeriksaan dan penggantian komponen kritis dengan metode Age Replacement, sebagai dasar penyusunan jadwal preventive maintenance dalam meningkatkan kinerja sistem mesin [12].
13. Perhitungan Downtime Penggantian Komponen : Pada tahap ini dilakukan perhitungan untuk membandingkan downtime sebelum dan sesudah penerapan penggantian komponen. Selanjutnya, dilakukan penentuan kebutuhan penggantian komponen kritis selama satu tahun serta perhitungan waktu yang diperlukan dalam proses penggantian masing-masing komponen.

14. Perhitungan Interval Waktu Pemeriksaan : Proses perhitungan interval waktu pemeriksaan dilakukan berdasarkan data yang telah dikumpulkan untuk memperoleh interval waktu pemeriksaan yang optimal dan kebutuhan pemeriksaan komponen dalam periode satu tahun [10].

15. Hasil dan Pembahasan : Hasil dan pembahasan memuat penyajian berdasarkan analisis dari pengolahan data penelitian yang telah diperoleh dari tahapan sebelumnya.

16. Kesimpulan dan Saran : Pada tahap akhir ini, disusun kesimpulan berdasarkan hasil penelitian, khususnya interval waktu penggantian dan pemeriksaan komponen yang paling optimal, serta saran rekomendasi untuk penerapan di perusahaan serta sebagai bahan evaluasi bagi penelitian berikutnya.

III. Hasil dan Pembahasan

A. Mesin dan Komponen Mesin

Mesin compact granulation double roller adalah mesin press yang digunakan untuk memadatkan campuran bahan baku pupuk menjadi bentuk yang lebih padat dan stabil secara fisik. Proses ini berlangsung ketika material dialirkan ke celah dua rol yang berputar berlawanan arah dan diberi tekanan tinggi, sehingga partikel-partikel bahan mengalami densifikasi dan membentuk lembaran padat yang kemudian dipecah menjadi butiran dengan ukuran tertentu. Teknologi ini termasuk dalam proses granulasi kering karena tidak memerlukan penambahan air maupun bahan pengikat selama pembentukan granul. Penggunaan sistem dua rol memungkinkan dihasilkannya granul dengan ukuran yang relatif seragam dan tingkat densitas (kepadatan) yang lebih tinggi dibandingkan bahan awalnya. Adapun komponen – komponen yang mengalami terjadinya kerusakan pada mesin compact granulation double roller, sebagai berikut:

1. Seal : Komponen seal berfungsi mendukung sistem kopling dalam meneruskan putaran antar komponen mesin, sehingga proses produksi berjalan stabil.
2. Bearing : Komponen bearing berfungsi menopang poros (shaft) sehingga dapat berputar dengan stabil, sekaligus mengurangi gesekan untuk menjaga kelancaran kinerja mesin selama proses operasi.
3. V-Belt : V-Belt berfungsi meneruskan putaran dari motor ke reducer atau gearbox serta membantu meredam getaran dan beban kejut ringan.
4. As atau Shaft (poros) : As atau Shaft berfungsi meneruskan putaran dan torsi dari sistem penggerak ke sistem double roller dan crusher agar proses kerja mesin dapat berlangsung secara efektif serta mendukung kelancaran proses produksi.
5. Sprocket : Sprocket merupakan komponen berbentuk roda bergigi yang berfungsi meneruskan putaran dan daya melalui rantai antar poros untuk menggerakkan sistem crusher, sehingga proses penghancuran berlangsung secara kontinu.
6. Rantai : Rantai berfungsi menyalurkan transmisi daya ke bagian crusher agar material pupuk yang masih berupa flake (bentuk cetak) dapat dihancurkan.

a. Data Kerusakan dan Penggantian Komponen Mesin

Data historis merupakan data mesin beserta komponen-komponen yang mengalami kerusakan dan penggantian selama Januari 2025 – Desember 2025 adalah sebagai berikut ini:

Data historis merupakan data mesin compact granulation double roller beserta komponen-komponen kritis mengalami kerusakan dan penggantian selama Januari – Desember 2025. Adapun data waktu kerusakan dan penggantian komponen seal dan bearing sebagai berikut ini

Tabel 2. Rekapitulasi Data Waktu Kerusakan dan Penggantian Komponen Seal

No.	Tanggal	Downtime (Menit)
1	06/01/2025	309
2	12/02/2025	140
3	06/03/2025	65
4	19/03/2025	200
5	19/04/2025	346
6	07/06/2025	180
7	12/07/2025	120
8	01/08/2025	245
9	30/08/2025	350
10	17/10/2025	106
11	19/11/2025	195
12	15/12/2025	253
Total		2509

Tabel 3. Rekapitulasi Data Waktu Kerusakan dan Penggantian Komponen Bearing

No.	Tanggal	Downtime (Menit)
1	08/01/2025	74

2	25/01/2025	182
3	14/03/2025	260
4	10/05/2025	144
5	18/06/2025	96
6	15/07/2025	158
7	20/08/2025	245
8	17/10/2025	167
9	20/11/2025	124
10	24/12/2025	208
Total		1658

Tabel 4. Frekuensi Kerusakan dan Total Downtime Komponen Kritis

Komponen Kritis	Frekuensi Kerusakan	Total Downtime (Menit)
Seal	12	2509
Bearing	10	1658
Total		4167

Diketahui bahwa pada Tabel 2 dan Tabel 3 merupakan rekapitulasi waktu kerusakan dan penggantian selama Januari 2025 – Desember 2025. Tabel 4 menjelaskan bahwa terdapat 2 jenis komponen kritis di antaranya komponen seal yang mengalami frekuensi kerusakan sebanyak 12 kali dengan total downtime sebesar 2.509 menit dan komponen bearing yang mengalami frekuensi kerusakan sebanyak 10 kali dengan total downtime sebesar 1.658 menit. Maka dari itu, komponen tersebut akan di analisa pada proses pengolahan data.

b. Perhitungan Time To Failure (TTF) dan Time To Repair (TTR)

17. Penelitian ini dilakukan perhitungan data waktu kerusakan dan penggantian komponen mesin dengan menentukan nilai Time to Failure (TTF) dan Time to Repair (TTR) yang bertujuan untuk mengetahui tingkat keandalan mesin. Nilai Time to Failure (TTF) ditentukan berdasarkan interval waktu antara mesin kembali beroperasi normal setelah penggantian hingga terjadinya kegagalan berikutnya. Perhitungan Time to Failure (TTF) asumsikan dalam satuan hari karena dapat memberikan pengukuran yang lebih konsisten serta memudahkan proses perencanaan pemeliharaan dan evaluasi tingkat keandalan mesin dalam cakupan operasional yang lebih luas. Selain itu, nilai Time to Repair (TTR) ditentukan berdasarkan selang waktu mulai penggantian hingga mesin kembali beroperasi normal setelah proses penggantian selesai dilakukan [13]. Berikut merupakan contoh perhitungan Time to Failure (TTF) dan Time to Repair (TTR) pada masing-masing komponen kritis mesin Compact Granulation Double Roller, yang dapat disajikan sebagai berikut.

1. Time to Failure (TTF)

TTF = tanggal (06/01/2025) – Tanggal (12/02/2025)

= (37 hari x 24 jam/hari) x 60 menit

= 53.280 menit

2. Time to Repair (TTR)

TTR = 06/01/2025 02.30 - 07.39

= 309 menit

Tabel 5. TTF dan TTR Komponen Seal

No	Tanggal	Waktu Henti		TTF (Menit)	TTR (Menit)
		Mulai	Akhir		
1	06/01/2025	02.30	07.39	-	309
2	12/02/2025	12.07	14.27	53280	140
3	06/03/2025	09.15	10.20	31680	65
4	19/03/2025	10.45	14.05	18720	200
5	19/04/2025	01.47	07.33	44640	346
6	07/06/2025	8.36	11.36	70560	180
7	12/07/2025	15.05	17.05	50400	120
8	01/08/2025	10.23	14.28	28800	245
9	30/08/2025	18.00	23.50	41760	350
10	17/10/2025	21.42	23.28	69120	106
11	19/11/2025	10.38	13.53	47520	195
12	15/12/2025	15.48	20.01	37440	253

Tabel 6. TTF dan TTR Komponen Bearing

No.	Tanggal	Waktu Henti		TTF (Menit)	TTR (Menit)
		Mulai	Akhir		
1	08/01/2025	07.45	08.59	-	74
2	25/01/2025	13.08	16.10	24480	182
3	14/03/2025	16.24	20.44	69120	260
4	10/05/2025	05.15	07.39	82080	144
5	18/06/2025	14.34	16.10	56160	96
6	15/07/2025	15.40	18.18	38880	158
7	20/08/2025	13.21	17.26	51840	245
8	17/10/2025	02.10	4.57	83520	167
9	20/11/2025	00.15	2.19	48960	124
10	24/12/2025	12.27	15.55	48960	208

Diketahui bahwa pada Tabel 5 merupakan penyajian nilai Time to Failure (TTF) dan Time to Repair (TTR) untuk komponen seal pada mesin Compact Granulation Double Roller. Sedangkan pada Tabel 6 merupakan penyajian nilai Time to Failure (TTF) dan Time to Repair (TTR) untuk komponen bearing pada mesin Compact Granulation Double Roller. Kedua nilai tersebut selanjutnya digunakan sebagai parameter dalam proses pengolahan data.

B. Pengolahan Data

Setelah seluruh data penelitian terkumpul, tahap selanjutnya adalah dilakukan proses pengolahan data melalui beberapa tahapan yang meliputi identifikasi pola distribusi, menentukan goodness of fit test, perhitungan mean time to failure (MTTF) dan mean time to repair (MTTR), menentukan jadwal preventive maintenance dengan metode age replacement, perhitungan downtime setelah penggantian komponen dan perhitungan interval waktu pemeriksaan komponen.

a. Identifikasi Pola Distribusi

Pada tahap identifikasi pola distribusi, dilakukan uji Index of Fit terhadap data kerusakan dan penggantian komponen untuk mengetahui jenis distribusi probabilitas yang paling sesuai digunakan dalam proses analisis keandalan mesin. Pengujian distribusi ini dilakukan menggunakan dua jenis data, yaitu Time to Failure (TTF) dan Time to Repair (TTR). Distribusi 1 digunakan untuk menguji distribusi data Time to Failure (TTF), yaitu interval waktu antar mesin kembali beroperasi normal setelah penggantian hingga terjadinya kegagalan berikutnya. Sementara itu, Distribusi 2 digunakan untuk menguji distribusi data Time to Repair (TTR), yaitu selang waktu mulai penggantian hingga mesin kembali beroperasi normal setelah proses penggantian selesai dilakukan.

Proses identifikasi distribusi dilakukan dengan membandingkan beberapa jenis distribusi, di antaranya weibull, normal, lognormal, dan exponential, penentuan distribusi terbaik dilakukan dengan mempertimbangkan nilai statistik Anderson–Darling (Anderson–Darling test) terendah yang menunjukkan tingkat kecocokan paling optimal terhadap data. Selain itu, pemilihan distribusi pada masing-masing komponen juga mempertimbangkan nilai correlation coefficient terbesar atau yang nilainya paling mendekati 1 [9]. Nilai tersebut menunjukkan tingkat kesesuaian antara data kerusakan maupun penggantian dengan distribusi probabilitas yang diuji, sehingga distribusi terpilih dapat digunakan sebagai dasar dalam perhitungan parameter keandalan mesin secara lebih akurat. Hasil proses identifikasi distribusi berdasarkan nilai Anderson–Darling dan correlation coefficient dapat dilihat pada tabel di bawah ini.

Tabel 7. Probability Plot

Komponen	Keterangan	Anderson Darling	Correlation Coefficient	Distribusi Terpilih
Seal	Distribusi 1	1.252	0.992	Weibull
	Distribusi 2	1.135	0.994	Weibull
Bearing	Distribusi 1	1.536	0.980	Weibull
	Distribusi 2	1.287	0.996	Weibull

Diketahui hasil pada Tabel 7 menjelaskan bahwa pada komponen seal, distribusi 1 memiliki nilai Anderson–Darling sebesar 1,252 dengan correlation coefficient sebesar 0,992, sedangkan distribusi 2 memiliki nilai Anderson–Darling sebesar 1,135 dan correlation coefficient sebesar 0,994. Kemudian pada komponen bearing, distribusi 1 memiliki nilai Anderson–Darling sebesar 1,526 dengan correlation coefficient sebesar 0,980, sedangkan distribusi 2 memiliki nilai Anderson–Darling sebesar 1,287 dan correlation coefficient sebesar 0,996. Oleh karena itu, distribusi yang terpilih pada kedua komponen tersebut untuk distribusi 1 dan distribusi 2 adalah distribusi Weibull. Distribusi Weibull sangat relevan untuk komponen mekanis yang mengalami wear out seiring bertambahnya umur operasi [14].

Setelah dilakukan identifikasi pola distribusi menggunakan uji index of fit berdasarkan data Time to Failure (TTF) dan Time to Repair (TTR) pada tiap komponen, tahap selanjutnya adalah melakukan goodness of fit test untuk memastikan bahwa distribusi terpilih telah sesuai dengan distribusi teoritis yang diuji. Pengujian ini dilakukan dengan melihat hasil dari nilai P-

value, di mana distribusi dinyatakan sesuai apabila nilai P-value yang dihasilkan lebih besar dari tingkat signifikansi $\alpha=0,05$ [10]. Berikut merupakan penyajian hasil goodness of fit test yang dapat dilihat pada tabel di bawah ini.

Tabel 8. Hasil Goodness of Fit Test

Komponen	Keterangan	AD	CC	P-Value	Distribusi Terpilih
Seal	Distribusi 1	1.252	0.992	0.250	Weibull
	Distribusi 2	1.135	0.994	0.250	Weibull
Bearing	Distribusi 1	1.536	0.980	0.250	Weibull
	Distribusi 2	1.287	0.996	0.250	Weibull

Diketahui hasil pada Tabel 8 menjelaskan bahwa nilai P-value pada masing-masing distribusi bernilai 0,250, sehingga distribusi yang diuji dinyatakan sesuai dengan distribusi teoritis. Oleh karena itu, parameter distribusi Weibull digunakan dalam proses pengolahan data selanjutnya. Adapun contoh perhitungan manual secara statistik dasar hanya untuk memberikan gambaran mengenai tahapan perhitungan. Berikut merupakan penyajian hasil parameter distribusi terpilih berdasarkan output dari software Minitab yang dapat dilihat pada tabel di bawah ini.

Tabel 9. Hasil Uji Distribusi Kerusakan Komponen Mesin

Komponen	Keterangan	Jenis Distribusi	Parameter yang digunakan	
			β (shape)	η (scale)
Seal	Distribusi 1	Weibull	2,91175	50480,5
	Distribusi 2	Weibull	2,21254	238,179
Bearing	Distribusi 1	Weibull	2,93702	62912,4
	Distribusi 2	Weibull	2,81155	186,852

Diketahui hasil pada Tabel 9 menjelaskan bahwa distribusi Weibull terpilih sebagai distribusi yang digunakan pada data Time to Failure (TTF) dan Time to Repair (TTR) untuk komponen seal dan bearing. Parameter distribusi Weibull yang digunakan terdiri dari β (shape) dan η (scale). Nilai parameter tersebut akan digunakan dalam perhitungan Mean Time to Failure (MTTF), Mean Time to Repair (MTTR), metode Age Replacement serta penentuan interval waktu pemeriksaan.

b. Perhitungan Mean Time To Failure (MTTF) dan Mean Time To Repair (MTTR)

Perhitungan nilai Mean Time To Repair (MTTR) dan Mean Time To Failure (MTTF) berdasarkan pola distribusi kerusakan komponen terpilih sehingga dapat menjadi acuan penting dalam menentukan interval penggantian komponen yang optimal [15]. Berikut merupakan contoh perhitungan Mean Time to Failure (MTTF) dan Mean Time to Repair (MTTR) dilakukan berdasarkan rumus perhitungan distribusi weibull, yang dapat disajikan sebagai berikut.

- Komponen Seal

$$\begin{aligned}
 \text{MTTF} &= \eta \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \\
 &= 50480,5 \Gamma \left(1 + \frac{1}{2,91175} \right) \\
 &= 50480,5 \times \Gamma(1,34344) \\
 &= 50480,5 \times 0,89184 \\
 &= 45021,76 \text{ menit} \\
 \text{MTTR} &= \eta \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \\
 &= 238,179 \Gamma \left(1 + \frac{1}{2,21254} \right) \\
 &= 238,179 \times \Gamma(1,45197) \\
 &= 238,179 \times 0,88564 \\
 &= 210,94 \text{ menit}
 \end{aligned}$$

Tabel 10. Hasil Perhitungan MTTF dan MTTR

Komponen	MTTF (Menit)	MTTR (Menit)
Seal	45021,76	210,94
Bearing	56128,87	166,41

Diketahui hasil pada Tabel 10 menjelaskan bahwa komponen seal nilai MTTF sebesar 45021,76 menit, sedangkan nilai MTTR sebesar 210,94 menit. Selanjutnya, komponen bearing nilai MTTF sebesar 56128,87 menit, sedangkan nilai MTTR sebesar 166,41 menit. Hasil dari perhitungan tersebut akan digunakan dalam perhitungan interval penggantian komponen menggunakan metode Age Replacement.

c. Penentuan Jadwal Preventive Maintenance dengan Metode Age Replacement

Dalam menentukan jadwal interval waktu penggantian komponen yang optimal, digunakan metode Age Replacement yang bertujuan untuk meminimalkan downtime mesin. Parameter yang digunakan dalam metode ini adalah jarak waktu antar kerusakan atau Distribusi 1 (Time to Failure), karena parameter tersebut digunakan sebagai dasar dalam menentukan nilai t_p , yaitu interval waktu penggantian komponen yang paling optimal. Berikut ini merupakan contoh perhitungan dengan metode Age Replacement pada komponen seal:

$$\begin{aligned}
 1. \quad R(63558) &= 1 - e^{-\frac{tp^\beta}{\eta}} \\
 &= 1 - e^{-\frac{63558^{2,91175}}{50480,5}} \\
 &= 1 - e^{-1,9558} \\
 &= 1 - 0,14146 \\
 &= 0,858539921 \\
 2. \quad F(63558) &= 1 - R(tp) \\
 &= 1 - 0,85853992 \\
 &= 0,141460079 \\
 3. \quad M(63558) &= \frac{MTTF}{F(tp)} \\
 &= \frac{45021,76}{0,141460079} \\
 &= 318264,7738 \\
 4. \quad D(63558) &= \frac{(MTTR \times R(tp)) + (MTTR \times F(tp))}{((tp + MTTR) \times R(tp)) + ((M(tp) + MTTR) \times F(tp))} \\
 &= \frac{(210,94 \times 0,858539921) + (210,94 \times 0,141460079)}{((63558 + 210,94) \times 0,858539921) + ((318264,7738 + 210,94) \times (0,141460079))} \\
 &= 0,002113632
 \end{aligned}$$

Tabel 11. Perhitungan Metode Age Replacement Komponen Seal

tp	R(tp)	F(tp)	M(tp)	D(tp)
10	1.64979E-11	1	45021.76	0.00466344
100	1.34642E-08	0.999999987	45021.76061	0.00466344
1000	1.09882E-05	0.999989012	45022.25471	0.004663439
10000	0.008927582	0.991072418	45427.31611	0.004654254
20000	0.065257758	0.934742242	48164.89293	0.004532654
30000	0.19728406	0.80271594	56086.78955	0.004123851
40000	0.398206648	0.601793352	74812.65758	0.003448932
50000	0.621877049	0.378122951	119066.4569	0.002763652
55000	0.80866293	0.19133707	235300.7701	0.002249967
60000	0.837875666	0.162124334	277698.9671	0.002170589
63558	0.858539921	0.141460079	318264.7738	0.002113632
65000	0.864068406	0.135931594	331208.9454	0.002189758
70000	0.90753085	0.09246915	486884.1146	0.002359716
75000	0.925022085	0.074977915	600466.9509	0.002561073
80000	0.957867526	0.042132474	1068576.217	0.002857653
Min D(tp)				0.002113632

Keterangan :

Min D(tp) = nilai probabilitas downtime terkecil

Berdasarkan pada Tabel 11 yang telah disajikan, diketahui bahwa nilai t_p merupakan interval waktu penggantian komponen yang paling optimal berdasarkan perhitungan metode Age Replacement. Nilai $R(t_p)$ menunjukkan tingkat keandalan komponen pada interval waktu $[(t)_p]$, sedangkan $F(t_p)$ menunjukkan probabilitas terjadinya kerusakan pada interval waktu tersebut. Selain itu, $M(t_p)$ merupakan rata-rata waktu terjadinya kerusakan apabila penggantian pencegahan dilakukan pada saat $[(t)_p]$. Sedangkan, nilai $D(t_p)$ menunjukkan probabilitas downtime, di mana nilai downtime terendah diperoleh pada saat $t_p=63.558$ menit. Oleh karena itu, interval waktu penggantian pencegahan yang optimal untuk komponen seal adalah setiap 63.558 menit. Selanjutnya, terdapat contoh perhitungan metode Age Replacement pada komponen bearing, di antaranya:

$$\begin{aligned}
 1. \quad R(75180) &= 1 - e^{-\frac{tp^\beta}{\eta}} \\
 &= 1 - e^{-\frac{75180^{2,93702}}{62912,4}} \\
 &= 1 - e^{-1,68748} \\
 &= 1 - 0,184994404 \\
 &= 0,815005596 \\
 2. \quad F(75180) &= 1 - R(tp) \\
 &= 1 - 0,815005596 \\
 &= 0,184994404 \\
 3. \quad M(75180) &= \frac{MTTF}{F(tp)} \\
 &= \frac{56128,87}{0,184994404} \\
 &= 303408,4754 \\
 4. \quad D(75180) &= \frac{(MTTR \times R(tp)) + (MTTR \times F(tp))}{((tp + MTTR) \times R(tp)) + ((M(tp) + MTTR) \times F(tp))}
 \end{aligned}$$

$$= \frac{(166,41 \times 0,815005596) + (166,41 \times 0,184994404)}{((75180 + 166,41) \times 0,815005596) + ((303408,4754 + 166,41) \times 0,184994404)}$$

$$= 0,001415443$$

Tabel 12. Perhitungan Metode Age Replacement Komponen Bearing

tp	R(tp)	F(tp)	M(tp)	D(tp)
10	6.96687E-12	1	56128.87	0.00295602
100	6.02637E-09	0.999999994	56128.87034	0.00295602
1000	5.21284E-06	0.999994787	56129.16259	0.00295602
10000	0.004499009	0.995500991	56382.53554	0.00295366
20000	0.033942961	0.966057039	58100.98965	0.002920799
30000	0.107392538	0.892607462	62881.91886	0.002796005
40000	0.232378662	0.767621338	73120.51814	0.002537108
50000	0.399091577	0.600908423	93406.6954	0.00218243
60000	0.581067068	0.418932932	133980.5628	0.001825486
70000	0.745447995	0.254552005	220500.6006	0.001534063
72000	0.776519336	0.223480664	251157.612	0.001481043
74254	0.803503636	0.196496364	285648.3896	0.001435081
75000	0.812802532	0.187197468	299837.7632	0.001462742
80000	0.868045528	0.131954472	425365.4246	0.001585752
85000	0.911079501	0.088920499	631225.3148	0.001717328
Min D(tp)				0.001435081

Keterangan :

Min D(tp) = nilai probabilitas downtime terkecil

Berdasarkan pada Tabel 12 yang telah disajikan, diketahui bahwa nilai t_p merupakan interval waktu penggantian komponen yang paling optimal berdasarkan perhitungan metode Age Replacement. Nilai $R(t_p)$ menunjukkan tingkat keandalan komponen pada interval waktu $\llbracket (t) \rrbracket_p$, sedangkan $F(t_p)$ menunjukkan probabilitas terjadinya kerusakan pada interval waktu tersebut. Selain itu, $M(t_p)$ merupakan rata-rata waktu terjadinya kerusakan apabila penggantian pencegahan dilakukan pada saat $\llbracket (t) \rrbracket_p$. Sedangkan, nilai $D(t_p)$ menunjukkan probabilitas downtime, di mana nilai downtime terendah diperoleh pada saat $t_p = 75.180$ menit. Oleh karena itu, interval waktu penggantian pencegahan yang optimal untuk komponen seal adalah setiap 75.180 menit. Diketahui bahwa hasil perhitungan interval waktu penggantian komponen masih dinyatakan dalam satuan menit. Oleh karena itu, untuk mempermudah penyusunan jadwal preventive maintenance, interval waktu tersebut dikonversi ke dalam satuan hari. Adapun rumus konversi yang digunakan adalah sebagai berikut:

1. Komponen Seal

$$\text{Interval Waktu Penggantian (Hari)} = \frac{\text{Interval Waktu Penggantian (Menit)}}{24 \times 60}$$

$$= \frac{63.558 \text{ menit}}{1440 \text{ menit/hari}}$$

$$= 44,1375 \approx 44 \text{ Hari}$$

2. Komponen Bearing

$$\text{Interval Waktu Penggantian (Hari)} = \frac{\text{Interval Waktu Penggantian (Menit)}}{24 \times 60}$$

$$= \frac{75.180 \text{ menit}}{1440 \text{ menit/hari}}$$

$$= 52,2083 \approx 52 \text{ Hari}$$

Tabel 13. Interval Waktu Penggantian Komponen

No	Komponen	Interval Waktu Penggantian	
		Menit	Hari
1	Seal	63.558	44
2	Bearing	75.180	52

Berdasarkan hasil dari Tabel 13, diketahui bahwa interval waktu penggantian pada komponen seal setiap 44 Hari. Sedangkan, interval waktu penggantian pada komponen bearing setiap 52 Hari. Selanjutnya, dilakukan perhitungan downtime penggantian komponen untuk mengetahui frekuensi penggantian per tahun dan waktu penggantian dari masing-masing komponen

d. Perhitungan Downtime Penggantian Komponen

Perhitungan downtime setelah penggantian pencegahan dilakukan untuk mengetahui besarnya penurunan total downtime setelah diterapkannya penggantian komponen pada masing-masing komponen mesin menggunakan metode Age Replacement. Berikut merupakan perhitungan downtime penggantian, di antaranya:

1. Komponen *Seal*
 - 1) Total Waktu Kerja per Tahun

$$\text{Total waktu kerja per tahun} = \text{Hari Kerja selama 12 bulan} \times \text{jam kerja}$$

$$= 26 \text{ Hari} \times 12 \text{ bulan} \times 24 \text{ jam}$$

$$= 7488 \text{ Jam} \approx 312 \text{ Hari}$$
 - 2) Downtime Penggantian Komponen *Seal*

$$\text{Downtime} = D(tp) \times \text{jumlah bulan} \times \text{jumlah hari kerja} \times \text{jumlah menit}$$

$$= 0,002113632 \times 12 \times 26 \times 1440$$

$$= 949,61 \approx 950 \text{ menit}$$
 - 3) Total Kebutuhan Penggantian Komponen *Seal* Selama 1 Tahun

$$N = \frac{\text{Total waktu kerja per tahun}}{\text{Interval Waktu Penggantian}}$$

$$N = \frac{312 \text{ Hari}}{44 \text{ Hari}} = 7 \text{ Kali}$$
 - 4) Waktu Penggantian Komponen *Seal*

$$\text{Waktu Penggantian Komponen} = \frac{\text{Total Waktu Downtime Penggantian}}{\text{Waktu Penggantian per Tahun}}$$

$$= \frac{950}{7} = 135,7 \approx 136 \text{ menit}$$
2. Komponen *Bearing*
 - 1) Total Waktu Kerja per Tahun

$$\text{Total waktu kerja per tahun} = \text{Hari Kerja selama 12 bulan} \times \text{jam kerja}$$

$$= 26 \text{ Hari} \times 12 \text{ bulan} \times 24 \text{ jam}$$

$$= 7488 \text{ Jam} \approx 312 \text{ Hari}$$
 - 2) Downtime Penggantian Komponen *Bearing*

$$\text{Downtime} = D(tp) \times \text{jumlah bulan} \times \text{jumlah hari kerja} \times \text{jumlah menit}$$

$$= 0,001415443 \times 12 \times 26 \times 1440$$

$$= 693,93 \approx 694 \text{ menit}$$
 - 3) Kebutuhan Penggantian Komponen *Bearing* Selama 1 Tahun

$$N = \frac{\text{Total waktu kerja per tahun}}{\text{Interval Waktu Penggantian}}$$

$$N = \frac{312 \text{ Hari}}{52 \text{ Hari}} = 6 \text{ Kali}$$
 - 4) Waktu Penggantian Penggantian Komponen *Bearing*

$$\text{Waktu Penggantian Komponen} = \frac{\text{Total Waktu Downtime Penggantian}}{\text{Waktu Penggantian per Tahun}}$$

$$= \frac{694}{6} = 115,6 \approx 116 \text{ menit}$$

Tabel 14. Perbandingan Downtime Sebelum dan Setelah Penggantian Komponen

No	Komponen	Downtime Sebelum Penggantian Komponen (Menit)	Downtime Setelah Penggantian Komponen (Menit)
1	<i>Seal</i>	2509	950
2	<i>Bearing</i>	1658	694
Total		4167	1644

Berdasarkan hasil dari Tabel 14, diketahui terdapat perbandingan antara total downtime sebelum dan setelah dilakukan penggantian komponen pada masing-masing komponen mesin. Diketahui bahwa total downtime sebelum penggantian komponen sebesar 4.167 menit, sedangkan total downtime setelah penggantian komponen mengalami penurunan menjadi 1.644 menit. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penerapan metode Age Replacement mampu mengurangi downtime mesin sehingga proses operasional dapat berjalan normal kembali.

Tabel 15. Total Kebutuhan Penggantian Komponen Selama 1 Tahun

No	Komponen	Total Kebutuhan Penggantian Komponen Selama 1 Tahun
1	<i>Seal</i>	7 Kali
2	<i>Bearing</i>	6 Kali

Berdasarkan hasil dari Tabel 15, diketahui bahwa total kebutuhan penggantian komponen per tahun pada komponen seal sebanyak 7 kali. Sedangkan, total kebutuhan penggantian komponen per tahun pada komponen bearing sebanyak 6 kali. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penerapan metode Age Replacement dapat mengetahui kebutuhan penggantian komponen mesin selama satu tahun melalui penentuan interval penggantian komponen seal dan bearing dengan optimal.

Tabel 16. Waktu yang dibutuhkan untuk Penggantian Komponen

No	Komponen	Waktu yang dibutuhkan untuk Penggantian Komponen (Menit)
----	----------	--

1	<i>Seal</i>	136
2	<i>Bearing</i>	116

Berdasarkan hasil dari Tabel 16, diketahui bahwa waktu yang dibutuhkan untuk penggantian pada komponen seal sebesar 136 menit. Sedangkan, waktu yang dibutuhkan untuk penggantian pada komponen bearing sebesar 116 menit. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penerapan metode Age Replacement dapat memberikan estimasi waktu yang dibutuhkan selama penggantian komponen seal dan bearing dengan optimal.

e. Perhitungan Interval Waktu Pemeriksaan Komponen

Setelah diketahui perbandingan downtime sebelum dan sesudah penggantian komponen, tahap selanjutnya adalah menentukan interval waktu pemeriksaan komponen. Parameter yang digunakan dalam perhitungan ini adalah nilai Mean Time to Repair (MTTR) karena parameter tersebut menunjukkan rata-rata waktu yang dibutuhkan dalam proses pemeriksaan komponen. Berikut merupakan perhitungan untuk menentukan interval waktu pemeriksaan komponen seal dan bearing, sebagai berikut:

• Komponen Seal

1) Total Waktu Kerja per Bulan

Pada penelitian ini, perusahaan beroperasi selama hari Senin-Sabtu, sedangkan hari Minggu libur. Selain itu, hari libur nasional dan cuti bersama diasumsikan tidak termasuk dalam waktu operasional perusahaan. Sistem kerja berlangsung selama 24 jam penuh dengan pembagian tiga shift kerja.

$$\begin{aligned} \text{Total waktu kerja per bulan} &= \text{Hari Kerja per bulan} \times \text{jam kerja} \\ &= 26 \text{ Hari} \times 24 \text{ jam} = 624 \text{ Jam} \approx 37.440 \text{ menit} \end{aligned}$$

2) Jumlah Kerusakan Komponen Seal

Jumlah kerusakan yang dihitung dalam penelitian ini merupakan data kerusakan pada periode Januari hingga Desember 2025. Pada komponen seal, jumlah kerusakan yang terjadi selama periode 12 bulan tercatat sebanyak 12 kali.

3) Waktu Rata-rata Perbaikan Komponen Seal

$$\begin{aligned} \frac{1}{\mu} &= \frac{MTTR}{t} \\ \frac{1}{\mu} &= \frac{210,94 \text{ menit}}{37.440 \text{ menit}} \\ \mu &= \frac{1}{0,00563408} \\ \mu &= 177,49 \text{ menit} \end{aligned}$$

4) Waktu Rata-rata Pemeriksaan

$$\begin{aligned} \frac{1}{i} &= \frac{\text{Waktu rata - rata pemeriksaan}}{\text{Total waktu kerja per bulan}} \\ \frac{1}{i} &= \frac{60 \text{ menit}}{37.440 \text{ menit}} \\ i &= \frac{1}{0,00160256} \\ i &= 624 \text{ menit} \end{aligned}$$

5) Rata-rata Kerusakan

$$\begin{aligned} K &= \frac{\text{Jumlah kerusakan per tahun}}{\text{Jumlah bulan per tahun}} \\ K &= \frac{12}{12} = 1 \end{aligned}$$

6) Frekuensi Pemeriksaan

$$\begin{aligned} n &= \sqrt{\frac{k \times i}{\mu}} \\ n &= \sqrt{\frac{1 \times 624}{177,49}} \\ n &= \sqrt{3,51569} \\ n &= 1,87502 \end{aligned}$$

7) Interval Waktu Pemeriksaan

$$ti = \frac{\text{Total waktu kerja per bulan}}{n}$$

$$t_i = \frac{37.440 \text{ menit}}{1,87502}$$

$$t_i = 19.968,79 \text{ menit}$$

$$t_i = 332,81 \text{ jam}$$

$$t_i = 13,87 \text{ Hari} \approx 14 \text{ hari}$$

8) Total Kebutuhan Pemeriksaan Selama 1 Tahun

$$N = \frac{\text{Total waktu kerja per tahun}}{\text{Interval Waktu Pemeriksaan}}$$

$$N = \frac{312 \text{ Hari}}{14 \text{ Hari}} = 22 \text{ Kali}$$

Tabel 17. Interval Waktu Pemeriksaan Komponen

No	Komponen	Interval Waktu Pemeriksaan	
		Menit	Hari
1	Seal	19.968	14
2	Bearing	24.671	17

Berdasarkan hasil dari Tabel 17, diketahui bahwa interval waktu pemeriksaan pada komponen seal setiap 14 Hari. Sedangkan, interval waktu pemeriksaan pada komponen bearing setiap 17 Hari. Interval waktu pemeriksaan tersebut menjadi acuan dalam pelaksanaan inspeksi berkala untuk mendeteksi potensi kerusakan sejak dini, sehingga dapat mendukung kesiapan dalam pelaksanaan penggantian komponen ketika komponen telah mencapai batas umur pengantiannya.

Tabel 18. Total Kebutuhan Pemeriksaan Komponen Selama 1 Tahun

No	Komponen	Total Kebutuhan Pemeriksaan Komponen Selama 1 Tahun
1	Seal	22 Kali
2	Bearing	18 Kali

C. Hasil dan Pembahasan

Setelah tahapan pengolahan data selesai dilakukan, tahap selanjutnya adalah memaparkan hasil analisis dan pembahasan berdasarkan hasil penelitian yang telah diperoleh.

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa komponen seal memiliki nilai MTTF sebesar 45.021,76 menit dan MTTR sebesar 210,94 menit, sedangkan komponen bearing memiliki nilai MTTF sebesar 56.128,87 menit dan MTTR sebesar 166,41 menit. Nilai tersebut menunjukkan bahwa komponen bearing memiliki rata-rata waktu operasi sebelum mengalami kerusakan yang lebih lama dibandingkan komponen seal.

Berdasarkan hasil perhitungan metode Age Replacement, interval waktu penggantian pencegahan yang optimal pada komponen seal diperoleh pada saat $t_p = 63.558$ menit. Sedangkan, pada komponen bearing, interval waktu penggantian pencegahan yang optimal diperoleh pada saat $t_p = 75.180$ menit. Hasil tersebut menunjukkan bahwa komponen seal dan bearing masih dapat beroperasi dengan baik hingga mencapai interval waktu tersebut sebelum dilakukan penggantian komponen. Selain itu, penerapan metode Age Replacement juga menunjukkan adanya penurunan total downtime mesin. Sebelum dilakukan penggantian pencegahan, total downtime tercatat sebesar 4.167 menit, sedangkan setelah penerapan metode Age Replacement total downtime menurun menjadi 1644 menit. Hasil tersebut menunjukkan bahwa metode Age Replacement mampu mengurangi waktu henti mesin sehingga proses operasional dapat berjalan lebih efektif.

Berdasarkan hasil perhitungan interval waktu pemeriksaan komponen, diperoleh bahwa komponen seal memerlukan interval pemeriksaan setiap 17 hari. Sementara itu, komponen bearing memiliki interval pemeriksaan optimal setiap 14 hari. Dengan adanya interval pemeriksaan yang terjadwal, kondisi komponen dapat dipantau secara berkala sehingga potensi kerusakan dapat dideteksi lebih awal dan risiko downtime dapat diminimalkan.

Berdasarkan hasil pengolahan data yang telah dilakukan, diperoleh interval waktu penggantian dan pemeriksaan komponen yang optimal menggunakan metode Age Replacement. Penentuan interval tersebut menunjukkan bahwa penerapan metode Age Replacement mampu mendukung pelaksanaan preventive maintenance yang lebih, sehingga frekuensi kerusakan komponen dan risiko downtime mesin dapat diminimalkan. Berikut merupakan tabel interval waktu penggantian dan pemeriksaan pada masing-masing komponen.

Tabel 19. Interval Waktu Penggantian dan Pemeriksaan Komponen

No.	Komponen	Interval Waktu Penggantian dan Pemeriksaan Komponen	
		Penggantian	Pemeriksaan
1	Seal	44 hari	14 hari
2	Bearing	52 hari	17 hari

Tabel 20. Total Penggantian dan Pemeriksaan Komponen Selama 1 Tahun

No.	Komponen	Total Penggantian dan Pemeriksaan Komponen Selama 1 Tahun
-----	----------	---

		Penggantian	Pemeriksaan
1	Seal	7 kali	22 kali
2	Bearing	6 kali	18 kali

Berdasarkan hasil dari Tabel 19, diketahui bahwa komponen seal memiliki interval waktu penggantian optimal setiap 44 hari dan interval waktu pemeriksaan setiap 14 hari. Sementara itu, komponen bearing memiliki interval waktu penggantian optimal setiap 52 hari dengan interval waktu pemeriksaan setiap 17 hari. Kemudian, kebutuhan untuk waktu yang dibutuhkan untuk penggantian pada komponen seal sebesar 136 menit. Sedangkan, waktu yang dibutuhkan untuk penggantian pada komponen bearing sebesar 116 menit. Selain itu, hasil analisis menunjukkan bahwa kebutuhan waktu penggantian komponen seal adalah 136 menit, sedangkan komponen bearing memerlukan waktu penggantian selama 116 menit. Sedangkan berdasarkan Tabel 20, diketahui bahwa pada komponen seal diketahui total kebutuhan penggantian komponen per tahun sebanyak 7 kali dengan total kebutuhan pemeriksaan komponen per tahun sebanyak 22 kali. Sedangkan, pada komponen bearing diketahui total kebutuhan penggantian komponen per tahun sebanyak 6 kali dengan total kebutuhan pemeriksaan komponen per tahun sebanyak 18 kali. Berdasarkan interval waktu tersebut, telah disusun usulan jadwal preventive maintenance sebagai acuan pelaksanaan pemeliharaan.

V. Kesimpulan

Berdasarkan hasil identifikasi pola distribusi kerusakan menggunakan index of fit dan goodness of fit test, data kerusakan dan penggantian pada komponen seal dan bearing mengikuti distribusi weibull. Menunjukkan bahwa kerusakan pada komponen dipengaruhi oleh umur pakai (wear out failure), kondisi tersebut sesuai dengan karakteristik komponen seal dan bearing yang termasuk ke dalam kategori komponen non-repairable, di mana komponen yang mengalami kerusakan tidak dilakukan perbaikan, melainkan langsung diganti dengan komponen baru. Berdasarkan hasil analisis menggunakan metode Age Replacement, diperoleh interval waktu penggantian yang optimal pada komponen seal yaitu setiap 44 hari dengan kebutuhan sebanyak 7 kali per tahun. Sedangkan, komponen bearing selama 52 hari dengan penggantian sebanyak 6 kali per tahun. Penerapan metode tersebut juga mampu menurunkan total downtime mesin dari 4.167 menit menjadi 1.644 menit, sehingga metode Age Replacement dinilai efektif dalam mengurangi downtime dan meningkatkan efektivitas proses produksi. Hasil perhitungan interval waktu pemeriksaan menunjukkan bahwa komponen seal memerlukan pemeriksaan setiap 14 hari dengan kebutuhan sebanyak 22 kali per tahun, sedangkan komponen bearing setiap 17 hari dengan kebutuhan sebanyak 18 kali per tahun. Dengan demikian, metode Age Replacement tidak hanya efektif dalam menentukan waktu penggantian komponen yang optimal, tetapi juga membantu perusahaan memantau kondisi komponen secara berkala, sehingga potensi kerusakan dapat dicegah lebih awal, risiko downtime mesin dapat diminimalkan, dan kegiatan pemeliharaan dapat berjalan lebih terencana dan efisien. Untuk peneliti selanjutnya, disarankan untuk menambah objek penelitian pada komponen atau mesin lainnya agar hasil penelitian lebih luas dan menyeluruh. Selain itu, Perusahaan disarankan untuk meningkatkan pelatihan dan kesadaran karyawan mengenai pentingnya preventive maintenance serta melakukan evaluasi perawatan mesin secara berkala agar pelaksanaan pemeliharaan mesin dapat berjalan secara lebih terencana, efektif, dan berkelanjutan.

References

1. D. P. Arfin Dahlan, "Optimalisasi Kebijakan Subsidi Pupuk Organik dalam Mendukung Pertanian Berkelanjutan di Indonesia," *Cemara*, vol. 22, pp. 11–21, 2025. doi: <https://doi.org/10.24929/fp.v22i1.4270>.
2. E. Andhiyani, "Implementasi Kebijakan Revitalisasi Industri Pupuk Nasional," *J. Prakt. Keinsinyuran*, vol. 1, no. 3, pp. 1–5, 2024. doi: <https://doi.org/10.25170/jpk.v1i03.6414>.
3. J. P. Hidayat, M. A. Kusuma, N. A. Putri, and A. Hariyadi, "Granulator Performance for Urea Granule Quality: A Study on Material Balance and Recycle Seed Ratio," *Int. J. Mar. Eng. Innov. Res.*, vol. 10, no. 1, pp. 196–203, 2025. doi: <https://doi.org/10.12962/j25481479.v10i1.4762>.
4. T. Rachman, D. N. Watunglawar, M. D. Amperajaya, R. Adnan, and I. K. Sriwana, "Penentuan Interval Waktu Penggantian dan Perbaikan Komponen Kritis Mesin Bubut Type SS-850 di PT. Hamdan Jaya Makmur dengan Metode Age Replacement," *J. Metris*, vol. 23, pp. 52–61, 2022. doi: <https://doi.org/10.25170/metris.v23i01.3547>.
5. S. Novarika, W. Putri, C. Putri, and Suliawati, "Analisis Preventive Maintenance pada Forklift dan Reach Truck dengan Metode Menghitung Mean Time Between Failure (MTBF) dan Mean Time to Repair (MTTR) di PT Medan Distribusindo Raya," *JIME (Journal Industrial Manufacturing Engineering)*, vol. 9, no. November, pp. 117–128, 2025. doi: <https://doi.org/10.31289/jime.v9i2.16595>.
6. J. T. Juwandono and J. Purnama, "Analisa Pemeliharaan Mesin Produksi dengan Metode Reliability Centered Maintenance (RCM) dan Age Replacement," *JUTIN: Jurnal Teknik Industri Terintegrasi*, vol. 6, no. 3, pp. 483–491, 2023. doi: <https://doi.org/10.31004/jutin.v6i3.15768>.
7. E. A. Agustawan, M. Z. Fathoni, and D. Widyaningrum, "Usulan Preventive Maintenance pada Mesin Hanger Shot Blast Kazo dengan Menggunakan Metode Age Replacement di PT Barata Indonesia," *J. Manaj. dan Tek. Ind.*, vol. 11, no. 1, 2021. doi: <https://doi.org/10.30587/matrik.v22i1.2715>.
8. S. Azizi and A. Indra, "Analisa Perencanaan Perawatan untuk Mengurangi Biaya Downtime Mesin Produksi Air Bersih dengan Metode Age Replacement di Perumda Air Minum Tirta Terubuk Bengkalis," *J. Tek. Mesin*, vol. 11, no. 1, pp. 1–4, 2022. doi: <https://doi.org/10.22441/jtm.v11i1.9804>.
9. C. Riswanto, E. Sofyan, F. Setiawan, E. Noerachman, and I. Nazarullah, "Reliability Control Program Turbo Compressor 222254-1 Nitrogen Generation System Pesawat Boeing 777-300ER di PT GMF AeroAsia Tbk," *J. AL-AZHAR Indones. Seri Sains dan Teknol.*, vol. 9, no. 2, pp. 175–190, 2024. doi: <https://doi.org/10.36722/sst.v9i2.2517>.
10. R. G. Alamsyah and W. Widiasih, "Penentuan Interval Waktu Perawatan Komponen Kritis pada Mesin Injection Molding Plastik dengan Metode Age Replacement pada PT. XYZ," *J. HEURISTIC*, pp. 215–238, 2023. doi: <https://doi.org/10.30996/heuristic.v20i2.10160>.
11. A. Syaefudin, D. T. Santoso, J. Sumarjo, and R. D. Anjani, "Analisis Keandalan Mesin Menggunakan MTTR dan [ISSN 2714-7444 \(online\)](https://doi.org/10.21070/acopen.11.2026.14890), <https://acopen.umsida.ac.id>, published by [Universitas Muhammadiyah Sidoarjo](https://doi.org/10.21070/acopen.11.2026.14890)

Downtime untuk Menentukan Mesin Kritis pada Lini Produksi PT X," J. Mesin Nusantara, vol. 8, no. 2, pp. 149–158, 2025. doi: <https://doi.org/10.29407/jmn.v8i2.20403>.

12. I. Sodikin et al., "Penjadwalan Perawatan Mesin dengan Metode Preventive Maintenance & Predictive Maintenance (Studi Kasus di PLTD Kota Masohi)," J. Tekst., vol. 7, no. 1, pp. 37–46, 2024. doi: 10.59432/jute.v7i1.88.
13. E. A. Elsayed, Reliability Engineering, 3rd ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2021. doi: 10.1002/9781119665946.
14. A. Subhan, H. N. Firmansyah, and H. Yudiono, "Analisis Keandalan Mesin CBF64S Berdasarkan Metode Weibull dan Penentuan Akar Permasalahan Menggunakan Fault Tree Analysis," Angkasa J. Ilm. Bid. Teknol., vol. 17, no. 2, pp. 214–224, 2025. doi: 10.28989/angkasa.v17i2.2978.
15. I. Ramadhan, W. Widiasih, P. Studi, T. Industri, and M. Pumpungan, "Analisis Penggantian dan Perawatan pada Papermachine Bagian Wire dan Dryer Menggunakan Metode Reliability Centered Maintenance dan Age Replacement pada PT. X," J. Tekst., vol. 6, no. 1, pp. 1–14, 2023. doi: 10.59432/jute.v6i1.60.