

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil

4.1.1 Mesin injeksi Haitian MA8000

Mesin injeksi Haitian MA8000 adalah sebuah mesin injeksi plastik yang digunakan dalam proses manufaktur untuk membentuk berbagai produk plastik melalui metode *injection molding*. *Injection molding* adalah teknik dalam dunia manufaktur yang digunakan untuk membentuk material plastik (Permana *et al.*, 2021). Prinsip kerjanya adalah memanaskan material *thermoplastic* dalam kondisi padat hingga melunak dan meleleh menggunakan silinder pemanas. Setelah itu, material yang telah melunak disuntikkan ke dalam cetakan (*molding*) dengan tekanan tinggi. Di dalam cetakan, material akan mengalami pendinginan dan pengerasan, kemudian dikeluarkan sebagai produk akhir.

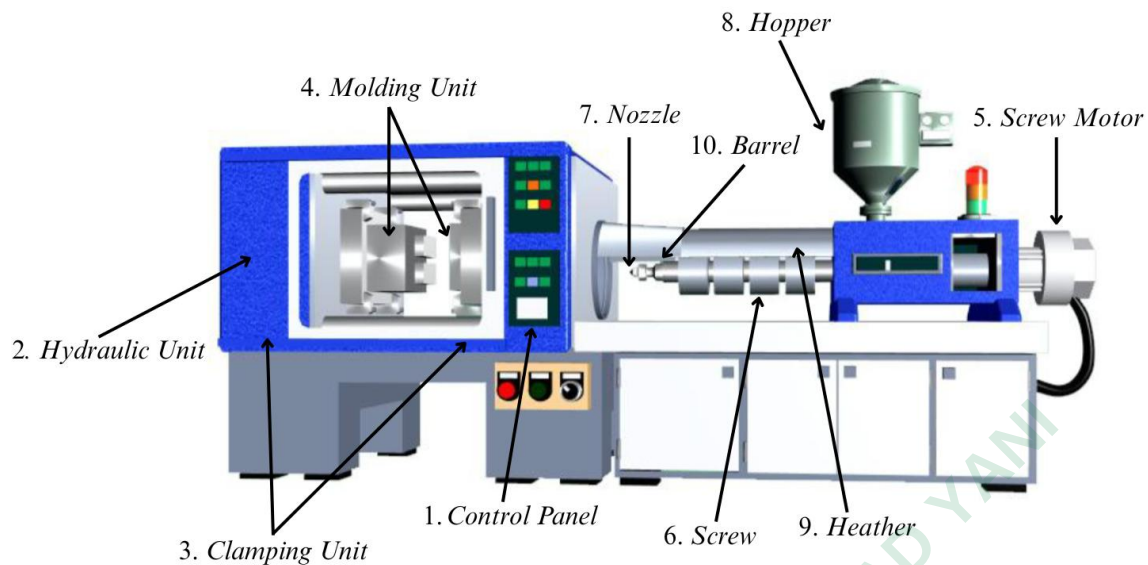


Gambar 4. 1 Mesin Injeksi Haitian MA8000

Sumber: PT SASS (2024)

4.1.2 Komponen Mesin

Mesin Injeksi Haitian MA8000 terdiri dari berbagai komponen utama yang berperan penting dalam mendukung proses operasional secara keseluruhan. Pada Gambar 4.2 berikut merupakan komponen yang ada pada mesin Haitian MA8000.



Gambar 4. 2 Komponen Mesin Injeksi Haitian MA8000

Sumber: PT SASS (2024)

Dari Gambar 4.2 dapat diketahui komponen yang ada pada mesin Injeksi Haitian MA8000. Berikut merupakan fungsi dari setiap komponen tersebut.

1. *Control panel* memiliki fungsi untuk mengontrol dan memantau operasi mesin secara keseluruhan.
2. *Hydraulic unit* memiliki fungsi sebagai penggerak dari *screw* dan *clamping unit*.
3. *Clamping unit* memiliki fungsi memegang serta mengatur gerakan dari *molding unit*.
4. *Molding unit* memiliki fungsi sebagai tempat mencetak material plastik sesuai dengan bentuk *molding*.
5. *Screw motor* memiliki fungsi sebagai penghasil daya untuk memutar *screw*.
6. *Screw* memiliki fungsi sebagai pembawa material dari *hopper* ke *nozzle*.
7. *Nozzle* memiliki fungsi untuk menyalurkan plastik cair dari *barrel* ke *mold* yang dibantu oleh *screw*.
8. *Hopper* memiliki fungsi sebagai wadah material plastik sebelum masuk ke *barrel* sekaligus menjaga kelembapan dari material.
9. *Heater* memiliki fungsi sebagai elemen pemanas pada *barrel* maupun *nozzle*.
10. *Barrel* memiliki fungsi sebagai tempat material plastik dipanaskan dan dicairkan.

4.1.3 Jam Kerja Mesin

PT SASS menerapkan sistem kerja tiga *shift* dalam operasional mesin Injeksi Haitian MA8000. Setiap *shift* berlangsung selama 8 jam tanpa jeda istirahat. Untuk mengurangi potensi *downtime* dan kegagalan produksi, waktu istirahat operator dilakukan secara bergantian. Adapun data jam kerja mesin disajikan sebagai berikut.

Tabel 4. 1 Jam Kerja Mesin

	Hari	Jam Kerja
<i>Shift</i> 1	Senin – Sabtu	07.00 – 15.00 WIB
<i>Shift</i> 2		15.00 – 23.00 WIB
<i>Shift</i> 3		23.00 – 07.00 WIB

Sumber: PT SASS (2024)

4.1.4 *Planned Downtime* dan *Breakdown* Mesin

Tabel 4.2 menyajikan data *planned downtime* pada mesin Injeksi Haitian MA8000, yang mencakup waktu henti terjadwal untuk kegiatan perawatan rutin setiap tiga bulan sekali. Perlu ditegaskan bahwa waktu istirahat operator tidak termasuk dalam *planned downtime*, karena selama istirahat tersebut mesin tetap beroperasi secara normal.

Tabel 4. 2 Data *Planned Downtime*

Bulan	Tanggal	<i>Planned Downtime</i> (Jam)
Juli	16/07/2024	8
Agustus	-	0
September	-	0
Oktober	20/10/2024	8
November	-	0
Desember	-	0

Sumber: PT SASS (2024)

Selain itu, Tabel 4.3 mencantumkan data terkait *breakdown*, yaitu kondisi ketika mesin berhenti secara tiba-tiba akibat kerusakan, serta proses *setup* yang merupakan tahapan penyesuaian awal sebelum mesin mulai memproduksi seperti pemasangan *molding* serta *setting* kondisi mesin.

Tabel 4. 3 Data *Breakdown* dan *Setup* Mesin

Bulan	<i>Breakdown</i> Mesin (Jam)	<i>Setup</i> Mesin (Jam)
Juli	1,5	13,5
Agustus	3,25	12
September	3,25	13

Bulan	Breakdown Mesin (Jam)	Setup Mesin (Jam)
Oktober	3,75	12
November	4	21
Desember	3,5	15

Sumber: PT SASS (2024)

4.1.5 Hasil Produksi

Berikut disajikan data hasil produksi pada produksi 4 (*injection & propeller*) yang dihasilkan oleh mesin Injeksi Haitian MA8000 selama periode Juli hingga Desember 2024. Data dalam Tabel 4.4 mencakup jumlah produk bagus (*good*) dan produk tidak bagus (*not good/NG*) yang dihasilkan selama proses produksi.

Tabel 4. 4 Data Hasil Produksi

Bulan	Total Produksi (pcs)	Total Not Good (pcs)	Total Good (pcs)
Juli	9.912	215	9.697
Agustus	11.500	60	11.440
September	12.500	132	12.368
Oktober	13.080	90	12.990
November	17.000	120	15.780
Desember	12.040	90	11.950

Sumber: PT SASS (Juli 2024)

4.1.6 Hari Produksi

Tabel 4.5 menyajikan data jumlah hari produksi pada mesin Injeksi Haitian MA8000 selama periode Juli hingga Desember 2024. Dalam tabel tersebut, hari tersedia mengacu pada total hari kerja yang tercantum dalam kalender produksi tidak termasuk tanggal merah ataupun hari minggu. Sedangkan, hari produksi menunjukkan jumlah hari aktual yang digunakan untuk menjalankan mesin. Untuk jam kerja mesin dihitung dari (jumlah hari produksi x 8 jam aktif kerja mesin x 3 *shift*). Sebagai contoh pada bulan Juli = (13 hari x 8 jam x 3 *shift*) = 312 jam.

Tabel 4. 5 Data Hari Produksi

Bulan	Hari Tersedia Kalender (Hari)	Hari Produksi (Hari)	Jam Kerja Mesin (Jam)
Juli	27	13	312
Agustus	26	12	288
September	24	13	312
Oktober	27	19	456
November	26	19	456
Desember	23	14	336

Sumber: PT SASS (2024)

4.1.7 Overall Equipment Effectiveness

Metode *Overall Equipment Effectiveness* (OEE) digunakan untuk mengukur tingkat efektivitas dari mesin cetak injeksi Haitian MA8000 di produksi 4 (*Injection & Propeller*) PT SASS. Data yang digunakan untuk analisis ini adalah data 6 bulan produksi yaitu bulan Juli – Desember 2024 dengan waktu 24 jam kerja atau 3 *shift*. Adapun nilai yang dihitung untuk menentukan nilai OEE adalah *availability*, *performance* dan *quality*. Berikut merupakan hasil perhitungan nilai OEE dari mesin Injeksi Haitian MA8000.

4.1.7.1 Availability

Dalam perhitungan nilai *availability*, data yang dibutuhkan mencakup waktu kerja total selama 24 jam per hari (*shift length*), waktu perawatan terjadwal (*planned downtime*), waktu istirahat (*break time*), serta waktu *setup* dan *breakdown*. Seluruh waktu dihitung dalam satuan jam. *Loading time* diperoleh dari pengurangan antara *shift length*, *planned downtime*, dan *break time* sesuai dengan Rumus 2.9. Selanjutnya, *downtime* merupakan penjumlahan dari waktu *setup* dan *breakdown* sebagaimana ditunjukkan pada Rumus 2.10. *Operation time* dihitung dengan mengurangi *downtime* dari *loading time* sesuai dengan Rumus 2.11, sedangkan *availability rate* menunjukkan persentase ketersediaan mesin untuk beroperasi terhadap waktu yang direncanakan, dihitung dengan *operation time* dibagi *loading time* dikali 100%, sebagaimana dijelaskan pada Rumus 2.12. Semakin tinggi nilainya, semakin baik tingkat ketersediaan mesin selama produksi. Berikut merupakan hasil perhitungan *availability rate* untuk periode Juli – Desember 2024 yang ditunjukkan oleh Tabel 4.6.

Tabel 4. 6 Hasil Perhitungan Nilai *Availability*

<i>Availability Rate</i>				
Bulan	<i>Loading Time</i> (jam)	<i>Downtime</i> (jam)	<i>Operation Time</i> (jam)	<i>Availability Rate</i>
Juli	304	15	289	95,07%
Agustus	288	15,25	272,75	94,70%
September	312	16,25	295,75	94,79%
Oktober	448	15,75	432,25	96,48%
November	438	27,75	410,25	93,66%
Desember	324	18,50	305,50	94,29%

4.1.7.2 Performance

Dalam perhitungan *performance*, data yang dibutuhkan meliputi *ideal cycle time* (dalam satuan jam per produk), total produksi (dalam satuan pieces), serta *operation time* (dalam satuan jam). *Ideal cycle time* dalam penelitian ini ditentukan berdasarkan rata-rata dari seluruh proses produksi, dengan asumsi bahwa dalam kondisi ideal mesin mampu menghasilkan sekitar 60 produk per jam. Asumsi ini diperoleh melalui pendekatan *expert judgement* dari operator berpengalaman. *Performance rate* menunjukkan tingkat kecepatan kerja mesin dibandingkan dengan kecepatan idealnya. Nilai ini dihitung dengan menggunakan Rumus 2.13, yaitu membagi *ideal cycle time* yang dikalikan total produk dengan *operation time*, kemudian dikalikan 100%. Semakin tinggi nilai persentasenya, semakin mendekati performa mesin terhadap standar ideal yang diharapkan. Hasil perhitungan *performance rate* untuk periode Juli–Desember 2024 ditunjukkan pada Tabel 4.7.

Tabel 4. 7 Hasil Perhitungan Nilai *Performance*

<i>Performance Rate</i>				
Bulan	<i>Operation Time</i> (jam)	Total Produksi (pcs)	<i>Cycle Time</i> (jam)	<i>Performance Rate</i>
Juli	289	9.912	0,016666667	57,16%
Agustus	272,75	11.500	0,016666667	70,27%
September	295,75	12.500	0,016666667	70,44%
Oktober	432,25	13.080	0,016666667	50,43%
November	410,25	17.000	0,016666667	69,06%
Desember	305,50	12.040	0,016666667	65,68%

4.1.7.3 Quality

Dalam perhitungan *quality*, data yang digunakan mencakup total produksi dan jumlah produk tidak bagus atau *Not Good* (NG). Jumlah produk bagus (*Good Product*) diperoleh dari selisih antara total produksi dan produk NG. *Quality rate* menunjukkan persentase produk yang memenuhi standar kualitas dibandingkan dengan total produksi. Nilai ini dihitung berdasarkan Rumus 2.14, yaitu membagi jumlah produk bagus dengan total produksi, lalu dikalikan 100%. Semakin tinggi persentasenya, semakin baik tingkat kualitas hasil produksi. Hasil perhitungan *quality rate* untuk periode Juli–Desember 2024 disajikan pada Tabel 4.8.

Tabel 4. 8 Hasil Perhitungan Nilai *Quality*

<i>Quality Rate</i>				
Bulan	Total Produksi (pcs)	Jumlah Produksi Not Good (pcs)	Jumlah Produksi Good (pcs)	<i>Quality Rate</i>
Juli	9.912	215	9.697	97,83%
Agustus	11.500	60	11.440	99,48%
September	12.500	132	12.368	98,94%
Oktober	13.080	90	12.990	99,31%
November	17.000	120	15.780	92,82%
Desember	12.040	90	11.950	99,25%

Setelah diperoleh nilai *availability rate*, *performance rate*, dan *quality rate*, langkah selanjutnya adalah menghitung nilai *Overall Equipment Effectiveness* (OEE) menggunakan Rumus 2.15. Hasil perhitungan OEE untuk periode Juli hingga Desember 2024 disajikan pada Tabel 4.9.

Tabel 4. 9 Hasil Perhitungan OEE

<i>Overall Equipment Effectiveness</i>				
Bulan	<i>Availability</i>	<i>Performance</i>	<i>Quality</i>	OEE
Juli	95,07%	57,16%	97,83%	53,16%
Agustus	94,70%	70,27%	99,48%	66,20%
September	94,79%	70,44%	98,94%	66,07%
Oktober	96,48%	50,43%	99,31%	48,33%
November	93,66%	69,06%	92,82%	60,05%
Desember	94,29%	65,68%	99,25%	61,47%
Rata-rata	94,83%	63,84%	97,94%	59,21%

Berdasarkan Tabel 4.9, nilai rata-rata OEE mesin injeksi Haitian MA8000 pada periode Juli hingga Desember 2024 adalah sebesar 59,21%. Jika dibandingkan dengan standar ideal OEE sebesar 85%, nilai tersebut tergolong rendah. Mengacu pada *benchmark* dari *Japan Institute of Plant Maintenance* (JIPM), rentang OEE berada di antara 40% hingga 60% dikategorikan sebagai kategori rendah dan menandakan bahwa efektivitas mesin masih belum optimal. Secara lebih rinci, nilai *availability* dan *quality* masing-masing berada pada angka 94,83% dan 97,94%, yang berarti sudah mendekati atau melampaui standar minimum. Namun, nilai *performance* hanya mencapai 63,84%, jauh di bawah standar sebesar 95%, sehingga menjadi penyebab utama rendahnya nilai OEE.

Rendahnya nilai *performance* ini mengindikasikan bahwa proses produksi belum berjalan dengan kecepatan yang ideal. Hal ini dapat disebabkan oleh beberapa faktor, di antaranya tingginya waktu *downtime*, termasuk waktu *setup* dan gangguan mesin (*breakdown*), serta waktu siklus aktual (*cycle time*) yang lebih lama dari waktu ideal. *Cycle time* yang lebih lama berarti bahwa mesin membutuhkan waktu lebih panjang untuk menyelesaikan satu siklus produksi dibandingkan waktu yang seharusnya. Hal ini dapat terjadi karena proses pendinginan yang tidak optimal, penyesuaian parameter yang belum tepat, atau respons mesin yang lambat akibat kondisi teknis tertentu.

4.1.8 *Total Effective Equipment Performance*

Berdasarkan Persamaan 2.16 dan 2.17, *Total Effective Equipment Performance* (TEEP) dihitung dengan mengalikan nilai *utilization* dengan *Overall Equipment Effectiveness* (OEE). Perhitungan ini bertujuan untuk mengukur seberapa efektif peralatan digunakan dibandingkan dengan waktu kalender yang tersedia secara keseluruhan. Seperti yang tertera pada Tabel 4.5, nilai *utilization* atau pemanfaatan mesin diperoleh dengan membandingkan jumlah hari kalender dengan jumlah hari aktual yang digunakan untuk produksi.

Perhitungan TEEP menjadi penting dilakukan karena rata-rata nilai OEE mesin Haitian MA8000 selama periode Juli hingga Desember 2024 hanya sebesar 59,21%, yang masih berada di bawah standar. Dari tiga komponen OEE, aspek *performance* memiliki nilai paling rendah yaitu 63,84%, jauh di bawah standar ideal sebesar 95%. Angka ini menunjukkan bahwa proses produksi belum berjalan dengan kecepatan yang seharusnya. Padahal, nilai *availability* dan *quality* sudah mendekati standar. Rendahnya *performance* ini menandakan adanya peluang perbaikan dari sisi efisiensi waktu produksi. Salah satu indikasinya adalah *cycle time* yang lebih lama dibandingkan waktu ideal, sehingga mesin memerlukan waktu lebih lama untuk menghasilkan satu produk. Untuk itu, analisis TEEP dibutuhkan guna mengevaluasi sejauh mana efektivitas mesin dapat ditingkatkan dengan memanfaatkan seluruh waktu kalender yang tersedia. Hasil perhitungan TEEP dapat dilihat pada Tabel 4.10.

Tabel 4. 10 Hasil Perhitungan TEEP

<i>Total Effective Equipment Performance</i>			
Bulan	Utilization	OEE	TEEP
Juli	48,15%	53,16%	25,60%
Agustus	46,15%	66,20%	30,55%
September	54,17%	66,07%	35,79%
Oktober	70,37%	48,33%	34,01%
November	73,08%	60,05%	43,88%
Desember	60,87%	61,47%	37,42%
Rata-rata	58,80%	59,21%	34,54%

Berdasarkan hasil perhitungan, nilai *Total Effective Equipment Performance* (TEEP) mesin Injeksi Haitian MA8000 selama periode Juli hingga Desember 2024 menunjukkan rata-rata sebesar 34,54%. Angka ini menunjukkan bahwa mesin hanya digunakan sekitar 34,54% dari total waktu kalender yang tersedia untuk produksi. Jika dibandingkan dengan standar TEEP global sebesar 80% menurut Joseph & Jayamohan, maka terdapat selisih sebesar 45,46%, yang mengindikasikan bahwa potensi pemanfaatan mesin masih belum optimal.

Rendahnya nilai TEEP ini sebagian besar dipengaruhi oleh nilai *performance* pada perhitungan OEE yang juga rendah. Faktor teknis seperti lamanya *cycle time*, frekuensi *setup*, dan waktu *idle* berkontribusi pada rendahnya efektivitas mesin. Di sisi lain, sistem produksi PT SASS yang berbasis *Make to Order* (MTO) turut memengaruhi rendahnya tingkat utilisasi mesin, karena produksi hanya dilakukan ketika ada pesanan. Oleh sebab itu, meskipun nilai TEEP tergolong rendah, kondisi ini juga mencerminkan karakteristik permintaan yang tidak konsisten setiap bulannya. Oleh karena itu, upaya optimalisasi dari sisi teknis tetap diperlukan agar waktu produksi yang tersedia dapat dimanfaatkan secara lebih efektif.

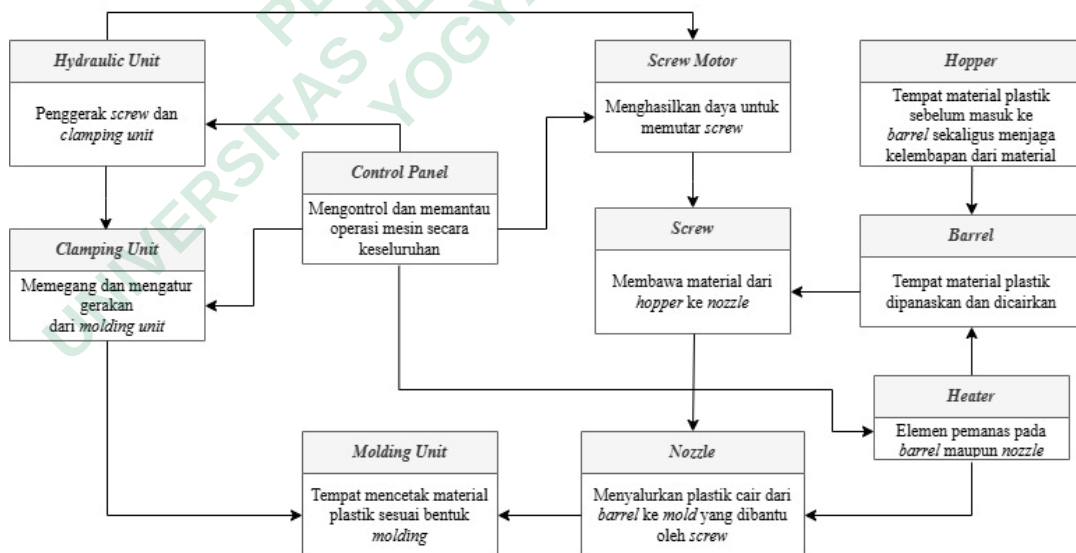
4.1.9 *Reliability Centered Maintenance*

Setelah proses pengumpulan informasi, pemilihan sistem, dan penetapan batasan sistem yang digunakan, tahap selanjutnya dari penerapan *Reliability Centered Maintenance* (RCM) pada Mesin Injeksi Haitian MA8000 untuk periode Juli–Desember 2024 dapat dilihat pada uraian berikut.

4.1.9.1 Functional Block Diagram

Langkah awal dalam *Reliability Centered Maintenance* (RCM) adalah membuat *Functional Block Diagram* (FBD) untuk memvisualisasikan alur kerja dan hubungan antar komponen mesin Haitian MA8000. Proses dimulai dengan memahami sistem operasi mesin secara menyeluruh dan mengumpulkan informasi dari diskusi dengan operator serta bagian *maintenance*. Setelah itu, dilakukan identifikasi komponen dan penyusunan alur proses dalam bentuk blok fungsional yang menggambarkan langkah kerja mesin. Terakhir, diagram yang dibuat divalidasi kembali bersama operator, kepala regu, serta bagian *maintenance* untuk memastikan keakuratan sebelum digunakan untuk analisis RCM lebih lanjut. FBD ini menjadi dasar untuk mengidentifikasi kegagalan fungsi dan mode kegagalan dalam tahap analisis RCM, sekaligus membantu mengenali titik rawan kerusakan yang dapat memengaruhi efektivitas mesin.

Gambar 4.3 memperlihatkan *Functional Block Diagram* (FBD) dari Mesin Injeksi Haitian MA8000, yang menggambarkan alur kerja utama serta hubungan antar komponen dalam proses operasional mesin tersebut.



Gambar 4. 3 FBD Mesin Injeksi Haitian MA8000

Berdasarkan Gambar 4.3, terlihat hubungan fungsional antar komponen utama pada Mesin Injeksi Haitian MA8000. *Functional Block Diagram* (FBD) ini menggambarkan alur kerja sistem secara menyeluruh, mulai dari pemasukan material hingga proses pencetakan produk jadi. Material plastik pertama-tama dimasukkan ke *hopper*, kemudian dialirkan ke *barrel* untuk dipanaskan dan dicairkan menggunakan *heater*. Material cair tersebut didorong oleh *screw* yang digerakkan oleh *screw motor* menuju *nozzle*, lalu disalurkan ke *molding unit* untuk dicetak sesuai bentuk *mold*. Selama proses berlangsung, *control panel* berperan mengatur dan memantau seluruh operasi mesin, sementara *hydraulic unit* menyediakan tenaga utama untuk pergerakan *screw* dan *clamping unit*. *Clamping unit* sendiri berfungsi menjepit dan mengatur posisi cetakan agar proses pencetakan berjalan presisi.

Seluruh komponen bekerja secara terintegrasi untuk menghasilkan produk cetakan plastik yang sesuai standar. Apabila salah satu komponen mengalami gangguan atau tidak berfungsi, maka keseluruhan proses produksi dapat terganggu. Misalnya, kerusakan pada *heater* akan menghambat proses pencairan material, atau jika *hydraulic unit* gagal beroperasi, maka pergerakan mekanik seperti penjepitan *molding* tidak dapat dilakukan. Hal ini menunjukkan bahwa kegagalan pada satu komponen dapat menyebabkan terhentinya proses produksi secara keseluruhan dan berdampak langsung terhadap kualitas serta kuantitas *output*.

4.1.9.2 Failure Mode and Effect Analysis

Penentuan komponen kritis pada mesin Injeksi Haitian MA8000 menggunakan metode *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) diawali dengan pemahaman menyeluruh terhadap sistem mesin berdasarkan *Functional Block Diagram* (FBD) yang telah dibuat sebelumnya. FBD menggambarkan hubungan fungsional antar komponen utama dan alur kerja mesin dari masuknya material hingga proses pencetakan produk. Selanjutnya, dikumpulkan informasi utama mengenai setiap komponen, yaitu fungsi utama komponen tersebut, kegagalan fungsional yang mungkin terjadi (*functional failure*), cara kegagalan terjadi (*failure modes*), akibat kegagalan terhadap mesin atau produk (*failure effects*), penyebab kegagalan (*cause of failure*), serta tindakan pengendalian yang saat ini diterapkan

untuk mencegah atau mengurangi kegagalan (*current controls*). Informasi ini dikumpulkan melalui diskusi dengan beberapa *expert* seperti kepala produksi, kepala departemen dan kepala bagian *maintenance*, serta operator mesin yang berpengalaman agar data yang diperoleh akurat dan lengkap.

Setelah itu, setiap mode kegagalan dianalisis dan dinilai berdasarkan tingkat keparahan dampaknya (*severity*), seberapa sering kegagalan terjadi (*occurrence*), dan seberapa mudah kegagalan tersebut dideteksi sebelum menimbulkan kerusakan serius (*detection*). Ketiga nilai ini digunakan untuk menghitung *Risk Priority Number* (RPN), yang menjadi acuan dalam menentukan prioritas perbaikan dan pemeliharaan. Proses ini kemudian divalidasi kembali bersama para *expert* untuk memastikan keakuratan hasil analisis. Hasil lengkap dapat dilihat pada Tabel 4.11, yang menjadi dasar dalam penentuan tindakan pemeliharaan pada komponen-komponen kritis.

Tabel 4. 11 FMEA Mesin Injeksi Haitian MA8000

FMEA Worksheet		Sistem: Operasi Mesin Injeksi Haitian MA8000							
		Subsistem: Mesin Injeksi Haitian MA8000							
Part/Process	Function	Functional Failure	Failure Modes	Failure Effects	S	Cause of Failure	O	Current Controls	D
Control Panel	Mengontrol dan memantau operasi mesin secara keseluruhan	Kerusakan pada inverter	Overheating	Motor berputar tidak stabil dan siklus injeksi terganggu.		Kipas pendingin rusak atau tersumbat debu		Melakukan pemeriksaan dan pemeliharaan segera saat terjadi penurunan kinerja atau kerusakan,	
			Overcurrent	Mesin bisa berhenti secara tiba-tiba		Beban motor terlalu besar			
			Gangguan komunikasi	Operator kesulitan mengatur inverter		Kabel komunikasi putus atau konektor longgar			
Hydraulic Unit	Penggerak screw dan clamping unit	Kebocoran pada selang hidrolik	Bocor pada sambungan selang	Sistem tidak dapat melakukan fungsi clamping dengan stabil.		Penurunan tekanan dan aliran fluida yang tidak stabil.		Pemeriksaan rutin selang hidrolik dan penggantian yang rusak agar sistem tetap stabil dan mesin tidak tiba-tiba berhenti.	
			Pecah atau robek pada selang	Mesin tidak dapat beroperasi dan bisa tiba-tiba berhenti.		Kehilangan tekanan total dan menyebabkan mesin berhenti secara tiba-tiba.			
			Selang aus atau retak akibat tekanan tinggi atau usia	Penurunan efisiensi sistem hidrolik dan ketidakstabilan tekanan		Kebocoran bertahap dan mengganggu stabilitas tekanan hidrolik.			
Clamping Unit	Memegang dan mengatur gerakan dari molding unit	Kegagalan pada sistem hidrolik	Pompa hidrolik tidak berfungsi dengan baik	Clamping unit tidak bergerak dengan normal atau lambat		Pompa rusak atau kurang oli yang menghambat aliran hidrolik.		Rutin cek dan ganti oli, periksa katup, kabel, dan sensor, serta segera perbaiki jika ada kebocoran atau komponen rusak.	
			Sistem kontrol hidrolik tidak akurat atau gagal berfungsi	Gerakan clamping unit menjadi tidak stabil		Pengaturan parameter salah menyebabkan			

FMEA Worksheet		Sistem: Operasi Mesin Injeksi Haitian MA8000							
		Subsistem: Mesin Injeksi Haitian MA8000							
Part/Process	Function	Functional Failure	Failure Modes	Failure Effects	S	Cause of Failure	O	Current Controls	D
Molding Unit	Tempat mencetak material plastik sesuai bentuk <i>molding</i>	Hasil cetakan cacat atau tidak sesuai bentuk.				kontrol yang tidak tepat.			
			Kabel atau sensor hidrolik rusak	Data atau kontrol sistem hidrolik tidak akurat		Mengganggu komunikasi sistem			
			Material tidak terisi penuh dalam mold (<i>short shot</i>)	Produk tidak terbentuk sempurna, dan harus diulang.		Tekanan injeksi kurang atau saluran aliran tersumbat.		Memastikan <i>setting</i> tekanan dan suhu sesuai, lakukan perawatan rutin pada <i>mold</i> dan mesin, serta periksa aliran material agar tetap lancar.	
			Permukaan cetakan kasar atau terdapat cacat (<i>sink mark, weld line</i>)	Produk tidak bisa digunakan dan harus diulang.		Suhu <i>barrel</i> tidak stabil serta alur aliran material tidak optimal.			
Screw Motor	Menghasilkan daya untuk memutar <i>screw</i>	<i>Screw</i> motor tidak berfungsi dengan baik sehingga tidak dapat memutar <i>screw</i> dengan normal.	Produk bengkok atau berubah bentuk setelah pendinginan (<i>warping</i>)	Produk tidak bisa digunakan dan harus diulang.		Pendinginan tidak merata			
			Terdapat <i>flash</i> atau sisa material di tepi cetakan	Perlu pemangkasan atau pembersihan tambahan		Tekanan <i>clamping</i> lemah			
			Kabel listrik putus atau koneksi longgar	Menyebabkan proses produksi terganggu hingga berhenti.		Kabel yang aus akibat getaran mesin atau tidak rapat saat pemasangan.		Periksa dan pastikan kabel terpasang dengan baik, serta lakukan pengecekan rutin untuk mencegah kabel aus.	
			Kerusakan pada motor listrik	<i>Screw</i> motor tidak bisa beroperasi sama sekali		<i>Overheating</i> (panas berlebih) akibat <i>overload</i> motor			
Screw Motor			Bantalan motor aus atau macet	<i>Screw</i> motor berputar dengan tidak stabil		Penggunaan bantalan motor dalam waktu			

FMEA Worksheet	Sistem: Operasi Mesin Injeksi Haitian MA8000								
	Subsistem: Mesin Injeksi Haitian MA8000								
Part/Process	Function	Functional Failure	Failure Modes	Failure Effects	S	Cause of Failure	O	Current Controls	D
Screw	Membawa material dari <i>hopper</i> ke <i>nozzle</i>	Screw tidak dapat mengangkut material dengan lancar dari <i>hopper</i> ke <i>nozzle</i> .	Material tersumbat di dalam <i>screw</i>	Aliran material terhenti, produksi terganggu, bahkan mesin bisa berhenti.		lama tanpa perawatan.		Lakukan pemeriksaan dan pemeliharaan rutin pada motor dan sistem penggerak <i>screw</i> , serta pastikan material bebas dari kontaminasi sebelum dimasukkan ke dalam mesin.	
			Masalah pada motor penggerak <i>screw</i>	Material tidak bisa dipindahkan ke <i>nozzle</i> .		kerusakan pada komponen listrik motor			
			Screw terganggu oleh kotoran atau kontaminasi dalam material	Material terhambat dan tercemar, sehingga bisa merusak mesin atau menurunkan kualitas produk.		Penanganan material yang tidak hati-hati.			
Nozzle	Menyalurkan plastik cair dari <i>barrel</i> ke <i>mold</i> yang dibantu oleh <i>screw</i>	Nozzle sering buntu karena material plastik hasil <i>crusher</i> tidak cukup bersih.	Pengaturan suhu <i>nozzle</i> tidak tepat, menyebabkan material mengeras	Nozzle tersumbat, aliran material berhenti, dan mesin tidak bisa berjalan.		Suhu pemanasan <i>nozzle</i> terlalu rendah atau tidak stabil.		Lakukan pemeriksaan rutin pada suhu <i>nozzle</i> , pastikan material bersih dan bebas kontaminasi, serta gunakan material berkualitas yang disimpan dengan baik.	
			Material plastik menggumpal atau menyumbat saluran <i>nozzle</i>	Material terhambat, proses produksi jadi lebih lambat bahkan bisa berhenti.		Kotoran atau kontaminasi dalam material, atau penggunaan material dengan ukuran tidak seragam.			
			Material tidak mencair dengan sempurna akibat kualitas material yang buruk	Produk yang dihasilkan cacat atau tidak sesuai dengan yang diinginkan.		Kualitas material buruk, kelembaban tinggi, atau material sudah terlalu lama disimpan.			

FMEA Worksheet		Sistem: Operasi Mesin Injeksi Haitian MA8000								
Subsistem: Mesin Injeksi Haitian MA8000										
Part/Process	Function	Functional Failure	Failure Modes	Failure Effects	S	Cause of Failure	O	Current Controls	D	
Hopper	Tempat material plastik sebelum masuk ke <i>barrel</i> sekaligus menjaga kelembapan dari material	<i>Hopper</i> tidak dapat menyuplai material plastik secara lancar ke <i>barrel</i>	Material tersumbat di dalam <i>hopper</i>	Proses injeksi terhenti atau produksi menjadi lambat.		Penyumbatan atau kontaminasi pada saluran <i>hopper</i> yang menghalangi aliran material.		Lakukan pemeriksaan dan pembersihan saluran <i>hopper</i> secara rutin untuk mencegah penyumbatan dan memastikan aliran material lancar.		
			Saluran material menuju <i>barrel</i> terhambat atau tersumbat	Kualitas produk menurun karena material tidak tercampur dengan sempurna.		Saluran material menuju <i>barrel</i> terhambat karena adanya benda asing atau penumpukan material.				
			Pengaturan aliran material tidak sesuai	Mesin mengalami <i>downtime</i> untuk membersihkan penyumbatan		<i>Valve</i> pengatur aliran rusak atau tidak terkalibrasi dengan benar				
Heater	Elemen pemanas pada <i>barrel</i> maupun <i>nozzle</i>	<i>Heater</i> tidak dapat mencapai atau mempertahankan suhu yang diperlukan untuk mencairkan material plastik, sehingga proses pemanasan terganggu.	<i>Heater</i> tidak mengalirkan panas dengan baik	Material tidak mencair dengan sempurna		Elemen pemanas rusak atau terbakar sehingga tidak dapat mengalirkan panas dengan baik.		Memeriksa rutin elemen pemanas, sensor suhu, dan koneksi listrik untuk memastikan semua komponen berfungsi dengan baik dan lakukan kalibrasi suhu secara berkala.		
			Suhu <i>heater</i> tidak stabil atau tidak tercapai sesuai yang diinginkan	Suhu tidak stabil sehingga membuat aliran material terhambat		Sensor suhu rusak atau tidak terkalibrasi dengan benar				
			Gangguan pada sistem pengaturan suhu	Peningkatan konsumsi energi karena heater bekerja lebih keras untuk mencapai suhu yang diinginkan.		Koneksi listrik longgar atau kabel putus menghalangi aliran listrik yang diperlukan untuk pemanasan.				

FMEA Worksheet		Sistem: Operasi Mesin Injeksi Haitian MA8000							
		Subsistem: Mesin Injeksi Haitian MA8000							
Part/Process	Function	Functional Failure	Failure Modes	Failure Effects	S	Cause of Failure	O	Current Controls	D
Barrel	Tempat material plastik dipanaskan dan dicairkan	Temperatur tidak merata	Kontrol temperatur (PID controller) tidak berfungsi dengan baik	Suhu barrel menjadi tidak stabil		Kerusakan pada PID controller atau kesalahan pengaturan parameter.		Melakukan pengecekan terlebih dahulu untuk memastikan kinerja yang optimal dan menghindari kerusakan yang dapat mempengaruhi proses pemanasan.	
			Pengendalian suhu heater tidak tepat	Material tidak mencair dengan sempurna,		Sensor suhu yang rusak atau salah kalibrasi.			
			Elemen pemanas pada barrel terbakar atau rusak	Area atau zone tertentu pada barrel tidak terpanaskan		Penuaan atau keausan elemen pemanas akibat penggunaan yang lama			

Tahap berikutnya adalah mengidentifikasi kerusakan fungsional pada setiap komponen mesin, sebagaimana disajikan dalam Tabel 4.11. Setelah itu, dilakukan penilaian tingkat kekritisitas dari masing-masing mode kegagalan menggunakan tiga parameter utama, yaitu *Severity* (S), *Occurrence* (O), dan *Detection* (D) yang dinilai oleh empat responden yang memahami kondisi aktual mesin. Ketiga nilai ini kemudian digunakan untuk menghitung *Risk Priority Number* (RPN), yang menjadi dasar dalam menentukan prioritas perbaikan. Komponen dengan nilai RPN tertinggi diprioritaskan karena memiliki risiko kegagalan paling besar. Rincian hasil penilaian S, O, dan D disajikan dalam Tabel 4.12.

Tabel 4. 12 Penilaian FMEA oleh Responden

Part/Process	Severity (S)					Occurrence (O)					Detection (D)				
	Responden					Responden					Responden				
	K. Regu/ Produksi	Kadept . MTC	Kabag. MTC	OPT. Mesin	Rata- rata	K. Regu/ Produksi	Kadept . MTC	Kabag. MTC	OPT. Mesin	Rata- rata	K. Regu/ Produksi	Kadept . MTC	Kabag. MTC	OPT. Mesin	Rata- rata
Control Panel	3	8	8	3	5,5	2	1	2	2	1,75	1	1	1	1	1
Hydraulic Unit	7	7	8	6	7	2	4	3	3	3	4	5	5	5	4,75
Clamping Unit	7	7	7	6	6,75	1	2	3	2	2	9	10	10	10	9,75
Molding Unit	5	3	6	5	4,75	1	1	3	2	1,75	9	10	10	10	9,75
Screw Motor	8	7	7	7	7,25	1	1	2	3	1,75	10	7	7	7	7,75
Screw	7	7	7	7	7	1	1	2	3	1,75	9	10	10	10	9,75
Nozzle	5	3	7	5	5	4	5	4	4	4,25	10	10	10	10	10
Hopper	7	2	6	5	5	2	1	4	4	2,75	10	9	9	9	9,25
Heater	7	7	6	4	6	5	5	5	5	5	5	2	2	2	2,75
Barrel	7	7	6	7	6,75	1	1	2	2	1,5	10	10	10	10	10

Berdasarkan hasil penilaian FMEA oleh keempat responden, langkah selanjutnya adalah menghitung nilai *Risk Priority Number* (RPN) untuk setiap komponen mesin. Perhitungan RPN dilakukan dengan mengalikan nilai *Severity* (S), *Occurrence* (O), dan *Detection* (D) seperti yang dituliskan pada Rumus 2.18. Dalam hal ini, nilai RPN dihitung berdasarkan rata-rata skor dari seluruh responden untuk masing-masing komponen, bukan per individu responden. Pendekatan ini dipilih untuk memperoleh gambaran yang lebih objektif dan representatif terhadap kondisi aktual mesin, dengan mempertimbangkan pandangan kolektif dari para *expert* yang memahami sistem secara menyeluruh. Hasil perhitungan nilai RPN untuk seluruh komponen mesin disajikan dalam Tabel 4.13.

Tabel 4. 13 Hasil Perhitungan Nilai RPN

<i>Part/Process</i>	<i>Severity (S)</i>	<i>Occurence (O)</i>	<i>Detection (D)</i>	RPN
<i>Control Panel</i>	5,5	1,75	1	9,625
<i>Hydraulic Unit</i>	7	3	4,75	99,75
<i>Clamping Unit</i>	6,75	2	9,75	131,625
<i>Molding Unit</i>	4,75	1,75	9,75	81,04688
<i>Screw Motor</i>	7,25	1,75	7,75	98,32813
<i>Screw</i>	7	1,75	9,75	119,4375
<i>Nozzle</i>	5	4,25	10	212,5
<i>Hopper</i>	5	2,75	9,25	127,1875
<i>Heater</i>	6	5	2,75	82,5
<i>Barrel</i>	6,75	1,5	10	101,25
Total				1063,25

Berdasarkan Tabel 4.13 dengan digunakannya Rumus 2.19 didapatkan nilai kritis komponen sebagai berikut.

$$\text{Nilai Kritis RPN} = \frac{1063,25}{10}$$

$$\text{Nilai Kritis RPN} = 106,325$$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa komponen yang tergolong kritis pada mesin Injeksi Haitian MA8000 meliputi *Clamping Unit* dengan RPN 131,625, *Screw* dengan RPN 119,4375, *Nozzle* dengan RPN 212,5, dan *Hopper* dengan RPN 127,1875, karena seluruhnya memiliki nilai RPN di atas ambang batas kritis yaitu sebesar 106,325.

4.1.9.3 Plotting Distribusi kerusakan komponen

Setelah diperoleh komponen kritis melalui analisis FMEA, tahap selanjutnya adalah *plotting* distribusi kerusakan komponen sebagai berikut.

1. Menghitung Waktu TTF dan TTR Komponen Kritis

Nilai *Time to Failure* (TTF) dihitung berdasarkan selang waktu antara suatu komponen mulai beroperasi normal setelah perbaikan, hingga terjadi kerusakan berikutnya. Sedangkan *Time to Repair* (TTR) merupakan waktu yang dibutuhkan untuk memperbaiki komponen yang rusak, yaitu dihitung dari saat kerusakan mulai terjadi hingga perbaikan selesai dilakukan. Adapun data yang digunakan merupakan data kerusakan setiap komponen mesin kritis selama jam operasional mesin. Berdasarkan data tersebut, dapat dihitung TTR dan TTF dari masing-masing komponen kritis untuk mengetahui seberapa sering komponen mengalami kerusakan.

a. Kerusakan *Nozzle*

Komponen *Nozzle* pada mesin Injeksi Haitian MA8000 tercatat sebagai komponen dengan frekuensi kerusakan tertinggi. Sebagai contoh, perhitungan nilai TTF dan TTR ditunjukkan untuk kasus kerusakan yang terjadi pada periode 9 Juli hingga 14 Agustus 2024. Perhitungan hari kerusakan didasarkan pada hari kerja, tanpa memasukkan hari libur nasional maupun tanggal merah.

$$\begin{aligned} \text{TTR} &= \text{Waktu Selesai Kerusakan} - \text{Waktu Mulai Kerusakan} \\ &= 13.10 - 12.40 \\ &= 0,5 \text{ Jam} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{TTF} &= \text{Interval Waktu (hari)} \times (8 \text{ Jam Kerja} \times 3 \text{ Shift}) + \text{Interval Waktu (Jam)} \\ &= 30 \text{ Hari} \times 24 \text{ Jam} + 21,35 \\ &= 741,35 \text{ Jam} \end{aligned}$$

Adapun rekapitulasi nilai TTF dan TTR dari kerusakan mesin Injeksi Haitian MA8000 pada komponen mesin *Nozzle* dapat dilihat pada Tabel 4.14 berikut.

Tabel 4. 14 Hasil Perhitungan TTF dan TTR Komponen *Nozzle*

Tanggal	Waktu Mulai Kerusakan	Waktu Selesai Kerusakan	Interval Waktu (Hari)	Interval Waktu (Jam)	TTR (Jam)	TTF (Jam)
09/07/2024	12.40	13.10	-	-	0,5	-
14/08/2024	09.45	10.45	30	21.35	1	741,35
05/09/2024	16.00	17.00	17	29,15	1	437,15
19/09/2024	09.15	10.15	10	16,15	1	256,15
15/10/2024	20.10	21.10	21	33,55	1	537,55
29/10/2024	11.05	11.35	11	13,55	0,5	277,55
08/11/2024	22.50	23.50	8	35,15	1	227,15
22/11/2024	13.10	14.10	11	13,20	1	277,20
18/12/2024	12.45	13.15	21	22.35	0,5	526,35

b. Kerusakan *Clamping Unit*

Komponen *Clamping Unit* pada mesin Injeksi Haitian MA8000 tercatat sebagai komponen dengan frekuensi kerusakan tertinggi kedua. Sebagai contoh, perhitungan nilai TTF dan TTR ditunjukkan untuk kasus kerusakan yang terjadi pada periode 16 Juli hingga 5 Agustus 2024. Perhitungan hari kerusakan didasarkan pada hari kerja, tanpa memasukkan hari libur nasional maupun tanggal merah.

TTR = Waktu Selesai Kerusakan – Waktu Mulai Kerusakan

$$= 14.45 - 15.00$$

$$= 0,25 \text{ Jam}$$

TTF = Interval Waktu (hari) x (8 Jam Kerja x 3 *Shift*) + Interval Waktu (Jam)

$$= 16 \text{ Hari} \times 24 \text{ Jam} + 20$$

$$= 404 \text{ Jam}$$

Adapun rekapitulasi nilai TTF dan TTR dari kerusakan mesin Injeksi Haitian MA8000 pada komponen mesin *Clamping Unit* dapat dilihat pada Tabel 4.15 berikut.

Tabel 4. 15 Hasil Perhitungan TTF dan TTR Komponen *Clamping Unit*

Tanggal	Waktu Mulai Kerusakan	Waktu Selesai Kerusakan	Interval Waktu (Hari)	Interval Waktu (Jam)	TTR (Jam)	TTF (Jam)
16/07/2024	14.45	15.00	-	-	0,25	-
05/08/2024	11.00	12.00	16	20	1	404
04/09/2024	12.10	12.40	24	24,10	0,5	600,10
10/09/2024	17.25	17.40	4	28,45	0,25	124,45
01/10/2024	10.20	10.35	16	16,40	0,25	400,40
02/10/2024	11.35	11.50	1	25	0,25	49
14/11/2024	16.40	17.10	36	28,50	0,5	892,50
09/12/2024	14.30	15.30	20	21,20	1	501,20

c. Kerusakan *Screw*

Komponen *Screw* pada mesin Injeksi Haitian MA8000 tercatat sebagai komponen dengan frekuensi kerusakan tertinggi ketiga. Sebagai contoh, perhitungan nilai TTF dan TTR ditunjukkan untuk kasus kerusakan yang terjadi pada periode 8 Juli hingga 15 Juli 2024. Perhitungan hari kerusakan didasarkan pada hari kerja, tanpa memasukkan hari libur nasional maupun tanggal merah.

TTR = Waktu Selesai Kerusakan – Waktu Mulai Kerusakan

$$= 23.15 - 23.30$$

$$= 0,25 \text{ Jam}$$

TTF = Interval Waktu (hari) x (8 Jam Kerja x 3 *Shift*) + Interval Waktu (Jam)

$$= 5 \text{ Hari} \times 24 \text{ Jam} + 9,50$$

$$= 129,50 \text{ Jam}$$

Adapun rekapitulasi nilai TTF dan TTR dari kerusakan mesin Injeksi Haitian MA8000 pada komponen mesin *Screw* dapat dilihat pada Tabel 4.16 berikut.

Tabel 4. 16 Hasil Perhitungan TTF dan TTR Komponen *Screw*

Tanggal	Waktu Mulai Kerusakan	Waktu Selesai Kerusakan	Interval Waktu (Hari)	Interval Waktu (Jam)	TTR (Jam)	TTF (Jam)
08/07/2024	23.15	23.30	-	-	0,25	-
15/07/2024	09.20	09.50	5	9,50	0,5	129,50
02/08/2024	08.15	08.45	15	22,25	0,5	382,25
09/08/2024	15.20	15.35	5	30,35	0,25	150,35
09/09/2024	13.25	13.40	24	21,50	0,25	597,50
26/10/2024	16.35	17.35	39	26,55	1	962,55
04/12/2024	12.15	12.45	32	18,40	0,5	786,40
13/12/2024	11.50	12.50	7	23,05	1	191,05

d. Kerusakan *Hopper*

Komponen *Hopper* pada mesin Injeksi Haitian MA8000 tercatat sebagai komponen dengan frekuensi kerusakan tertinggi keempat. Sebagai contoh, perhitungan nilai TTF dan TTR ditunjukkan untuk kasus kerusakan yang terjadi pada periode 8 Agustus hingga 17 September 2024. Perhitungan hari kerusakan didasarkan pada hari kerja, tanpa memasukkan hari libur nasional maupun tanggal merah.

$TTR = \text{Waktu Selesai Kerusakan} - \text{Waktu Mulai Kerusakan}$

$$= 13.55 - 13.25$$

$$= 0,5 \text{ Jam}$$

$TTF = \text{Interval Waktu (hari)} \times (8 \text{ Jam Kerja} \times 3 \text{ Shift}) + \text{Interval Waktu (Jam)}$

$$= 30 \text{ Hari} \times 24 \text{ Jam} + 21,40$$

$$= 741,40 \text{ Jam}$$

Adapun rekapitulasi nilai TTF dan TTR dari kerusakan mesin Injeksi Haitian MA8000 pada komponen mesin *Hopper* dapat dilihat pada Tabel 4.17 berikut.

Tabel 4. 17 Hasil Perhitungan TTF dan TTR Komponen *Hopper*

Tanggal	Waktu Mulai Kerusakan	Waktu Selesai Kerusakan	Interval Waktu (Hari)	Interval Waktu (Jam)	TTR (Jam)	TTF (Jam)
08/08/2024	13.25	13.55	-	-	0,5	-
17/09/2024	11.35	11.50	31	21,40	0,25	765,40
22/10/2024	14.05	14.35	29	26,15	0,5	722,15

Tanggal	Waktu Mulai Kerusakan	Waktu Selesai Kerusakan	Interval Waktu (Hari)	Interval Waktu (Jam)	TTR (Jam)	TTF (Jam)
05/11/2024	18.45	19.00	11	28,10	1	292,10
20/11/2024	10.40	10.55	12	15,40	0,5	303,40
10/12/2024	14.25	14.40	16	27,30	0,5	411,30

2. Uji *Goodnes of Fit* TTR dan TTF Komponen Kritis

Setelah diperoleh data *Time to Repair* (TTR) dan *Time to Failure* (TTF) dari komponen-komponen kritis, langkah berikutnya adalah menentukan jenis distribusi statistik yang paling sesuai dengan data tersebut. Proses ini dilakukan melalui uji *Goodness of Fit* menggunakan bantuan perangkat lunak *EasyFit 5.5 Professional*.

3. Hasil Uji *Goodnes of Fit* TTR dan TTF Komponen Kritis

Berikut merupakan hasil uji *goodness of fit* TTR dan TTF untuk komponen kritis.

Tabel 4. 18 Hasil Uji *Goodness of Fit* Komponen Kritis

	Part/Process	Distribution	Statistic	Ranking
Time to Repair (TTR)	Nozzle	1. Normal	1. 0,41417	2
		2. Lognomal	2. 0,42692	3
		3. Exponential	3. 0,45119	4
		4. Weibull	4. 0,33906	1
	Clamping Unit	1. Normal	1. 0,2775	1
		2. Lognomal	2. 0,31714	3
		3. Exponential	3. 0,39347	4
		4. Weibull	4. 0,29684	2
	Screw	1. Normal	1. 0,28994	3
		2. Lognomal	2. 0,24383	1
		3. Exponential	3. 0,37537	4
		4. Weibull	4. 0,24542	2
	Hopper	1. Normal	1. 0,40064	2
		2. Lognomal	2. 0,33333	1
		3. Exponential	3. 0,43604	4
		4. Weibull	4. 0,4112	3
Time to Failure (TTF)	Nozzle	1. Normal	1. 0,26635	2
		2. Lognomal	2. 0,27589	3
		3. Exponential	3. 0,42532	4
		4. Weibull	4. 0,20685	1
	Clamping Unit	1. Normal	1. 0,18058	1
		2. Lognomal	2. 0,32404	3
		3. Exponential	3. 0,3249	4
		4. Weibull	4. 0,31675	2
	Screw	1. Normal	1. 0,21708	3
		2. Lognomal	2. 0,21574	2
		3. Exponential	3. 0,24672	4
		4. Weibull	4. 0,21356	1

	<i>Part/Process</i>	<i>Distribution</i>	<i>Statistic</i>	<i>Ranking</i>
	<i>Hopper</i>	1. Normal	1. 0,249	1
		2. Lognormal	2. 0,26468	2
		3. Exponential	3. 0,44319	4
		4. Weibull	4. 0,30113	3

Berdasarkan hasil analisis distribusi pada Tabel 4.18, diketahui bahwa tiap komponen kritis mesin memiliki karakteristik distribusi tersendiri dalam hal *Time to Repair* (TTR) dan *Time to Failure* (TTF). Pada kategori TTR, komponen *Nozzle* memiliki kecocokan terbaik terhadap distribusi *Weibull* dengan nilai statistik Kolmogorov-Smirnov (K-S) sebesar 0,33906. Untuk *Clamping Unit*, distribusi terbaik adalah Normal dengan nilai K-S 0,2775, sedangkan *Screw* dan *Hopper* paling sesuai dengan distribusi Lognormal masing-masing dengan nilai statistik 0,24383 dan 0,33333. Sementara itu, pada kategori TTF, distribusi *Weibull* menjadi yang paling cocok untuk *Nozzle* dan *Screw*, masing-masing dengan nilai K-S 0,20685 dan 0,21356, mengindikasikan bahwa pola kerusakan komponen tersebut bersifat acak namun dapat diprediksi secara probabilistik. Adapun *Clamping Unit* dan *Hopper* lebih sesuai dengan distribusi Normal, dengan nilai statistik K-S sebesar 0,18058 dan 0,249. Secara umum, Tabel 4.18 menunjukkan bahwa tiap komponen memiliki pola kerusakan dan perbaikan yang berbeda. Distribusi terbaik dipilih berdasarkan nilai K-S terkecil, yang mencerminkan tingkat kecocokan tertinggi antara data dan distribusi teoritis. Pemilihan distribusi yang tepat menjadi dasar penting dalam menyusun strategi perawatan yang efektif, guna mengoptimalkan waktu kerja mesin dan menekan *downtime* tak terduga.

4.1.9.4 Perhitungan TTF, TTR, MTTF dan MTTR

Perhitungan ini dihitung menggunakan parameter distribusi yang sebelumnya sudah ditentukan berdasarkan uji *Goodness of Fit*, kemudian dihitung menggunakan rumus sesuai distribusi masing-masing.

1. Perhitungan *Time to Failure* (TTF) dan *Mean Time to Repair* (TTR)

Setelah uji *Goodness of Fit* dilakukan, langkah berikutnya adalah menghitung parameter distribusi *Time to Failure* (TTF) dan *Time to Repair* (TTR) pada

komponen kritis menggunakan perangkat lunak *Easyfit 5.5 Profesional*. Nilai parameter α , β , λ , μ , σ dihitung berdasarkan jenis distribusi yang telah didapatkan sebelumnya pada uji *Goodness of Fit*. Hasil rekapitulasi perhitungan parameter untuk komponen *Nozzle*, *Clamping Unit*, *Screw*, dan *Hopper* disajikan pada Tabel 4.19 berikut.

Tabel 4. 19 Rekapitulasi Hasil Parameter dari Uji *Goodnes of Fit* Komponen Kritis

	<i>Part/Process</i>	<i>Distribution</i>	<i>Statistic</i>	<i>Parameter</i>
<i>Time to Repair (TTR)</i>	<i>Nozzle</i>	<i>Weibull</i>	0,33906	$\alpha = 2,2851$ $\beta = 0,95313$
	<i>Clamping Unit</i>	Normal	0,2775	$\sigma = 0,32733$ $\mu = 0,5$
	<i>Screw</i>	Lognormal	0,24383	$\sigma = 0,54109$ $\mu = -0,77979$
	<i>Hopper</i>	Lognormal	0,33333	$\sigma = 0,40019$ $\mu = -0,69315$
<i>Time to Failure (TTF)</i>	<i>Nozzle</i>	<i>Weibull</i>	0,20685	$\alpha = 2,3968$ $\beta = 418,07$
	<i>Clamping Unit</i>	Normal	0,18058	$\sigma = 285,12$ $\mu = 424,52$
	<i>Screw</i>	<i>Weibull</i>	0,21356	$\alpha = 1,1593$ $\beta = 443,11$
	<i>Hopper</i>	Normal	0,249	$\sigma = 228,87$ $\mu = 498,87$

Berdasarkan Tabel 4.19, hasil perhitungan menunjukkan bahwa TTR pada komponen *Nozzle* mengikuti distribusi *Weibull* yang menggambarkan tingkat keandalan perbaikan yang berubah seiring waktu. Komponen *Clamping Unit* mengikuti distribusi Normal, yang menunjukkan bahwa sebagian besar waktu perbaikannya berada di sekitar rata-rata. Adapun komponen *Screw* dan *Hopper* mengikuti distribusi Lognormal yang berarti sebagian besar perbaikannya berlangsung cepat, namun ada beberapa yang membutuhkan waktu lebih lama. Sementara itu, untuk TTF, ditemukan dua jenis distribusi. Komponen *Clamping Unit* dan *Hopper* mengikuti distribusi Normal, sedangkan *Nozzle* dan *Screw* mengikuti distribusi *Weibull*. Hal ini menunjukkan bahwa kerusakan pada *Clamping Unit* dan *Hopper* cenderung terjadi mendekati rata-rata waktu tertentu, sedangkan kerusakan pada *Nozzle* dan *Screw* bersifat acak dan meningkat seiring waktu penggunaan.

2. Perhitungan *Mean Time to Repair* (MTTR) dan *Mean Time to Failure* (MTTF)
Perhitungan ini bertujuan untuk mengetahui rata-rata waktu antar kerusakan komponen (MTTF) dan rata-rata waktu perbaikannya (MTTR) guna memperoleh gambaran yang lebih jelas mengenai keandalan dan kinerja operasional mesin. Informasi ini penting untuk mengidentifikasi potensi masalah lebih awal sehingga dapat dicegah sebelum menimbulkan *downtime* yang besar.

a. *Mean Time to Repair* (MTTR)

Berikut merupakan perhitungan MTTR pada komponen kritis.

1) *Nozzle*

Berdasarkan Tabel 4.19, *Nozzle* memiliki distribusi *Weibull* dengan parameter $\alpha = 2,2851$ dan $\beta = 0,95313$. Berikut perhitungannya menggunakan Rumus 2.29.

- Menghitung fungsi *Gamma*

$$MTTR = \beta \Gamma \left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)$$

$$\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) = \left(1 + \frac{1}{2,2851}\right) = 1 + 0,44 = 1,44$$

- Menghitung nilai fungsi *Gamma*

$$\Gamma \left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) = \Gamma (1,44) = 0,89$$

- Menghitung nilai MTTR

$$MTTR = \beta \Gamma \left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)$$

$$MTTR = 0,95313 \times 0,89 = 0,85 \text{ jam} = 51 \text{ menit}$$

Dengan menggunakan distribusi *Weibull* dan parameter $\alpha=2,2851$ serta $\beta=0,95313$ diperoleh nilai MTTR untuk komponen *nozzle* sebesar 0,85 jam atau 51 menit. Nilai ini mengindikasikan bahwa rata-rata waktu yang dibutuhkan untuk memperbaiki komponen tersebut relatif singkat.

2) *Clamping Unit*

Berdasarkan Tabel 4.19, *Clamping unit* memiliki distribusi Normal dengan parameter $\sigma = 0,32733$ dan $\mu = 0,5$. Berikut perhitungannya menggunakan Rumus 2.20.

- Menghitung MTTR

$$MTTR = \mu$$

$$MTTR = 0,5 \text{ jam} = 30 \text{ menit}$$

Dengan menggunakan distribusi Normal dan parameter $\sigma = 0,32733$ serta $\mu = 0,5$ diperoleh nilai MTTR untuk komponen *clamping unit* sebesar 0,5 jam atau 30 menit. Nilai ini mengindikasikan bahwa rata-rata waktu yang dibutuhkan untuk memperbaiki komponen tersebut relatif singkat.

3) *Screw*

Berdasarkan Tabel 4.19, *Screw* memiliki distribusi Lognormal dengan parameter $\sigma = 0,54109$ dan $\mu = -0,77979$. Berikut perhitungannya menggunakan Rumus 2.23.

- Menghitung nilai eksponen

$$MTTR = e^{\mu + \frac{\sigma^2}{2}}$$

$$\mu + \frac{\sigma^2}{2} = (-0,77979) + \frac{(0,54109)^2}{2} = (-0,77979) + 0,29 = -0,49$$

- Menghitung MTTR dari nilai eksponen

$$MTTR = e^{\mu + \frac{\sigma^2}{2}}$$

$$MTTR = e^{-0,49} = 0,61 \text{ jam} = 37 \text{ menit}$$

Dengan menggunakan distribusi Lognormal dan parameter $\sigma = 0,54109$ serta $\mu = -0,77979$ diperoleh nilai MTTR untuk komponen *screw* sebesar 0,61 jam atau 37 menit. Nilai ini mengindikasikan bahwa rata-rata waktu yang dibutuhkan untuk memperbaiki komponen tersebut relatif singkat.

4) *Hopper*

Berdasarkan Tabel 4.19, *Hopper* memiliki distribusi Lognormal dengan parameter $\sigma = 0,40019$ dan $\mu = -0,69315$. Berikut perhitungannya menggunakan Rumus 2.23.

- Menghitung nilai eksponen

$$MTTR = e^{\mu + \frac{\sigma^2}{2}}$$

$$\mu + \frac{\sigma^2}{2} = (-0,69315) + \frac{(0,40019)^2}{2} = (-0,69315) + 0,16 = -0,53$$

- Menghitung MTTR dari nilai eksponen

$$MTTR = e^{\mu} + \frac{\sigma^2}{2}$$

$$MTTR = e^{-0,53} = 0,59 \text{ jam} = 35 \text{ menit}$$

Dengan menggunakan distribusi Lognormal dan parameter $\sigma = \sigma = 0,40019$ serta $\mu = -0,69315$ diperoleh nilai MTTR untuk komponen *hopper* sebesar 0,59 jam atau 35 menit. Nilai ini mengindikasikan bahwa rata-rata waktu yang dibutuhkan untuk memperbaiki komponen tersebut relatif singkat.

b. *Mean Time to Failure* (MTTF)

1) *Nozzle*

Berdasarkan Tabel 4.19, *Nozzle* memiliki distribusi *Weibull* dengan parameter $\alpha = 2,3968$ dan $\beta = 418,07$. Berikut perhitungannya menggunakan Rumus 2.29.

- Menghitung fungsi *Gamma*

$$MTTR = \beta \Gamma \left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)$$

$$\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) = \left(1 + \frac{1}{2,3968}\right) = 1 + 0,41 = 1,41$$

- Menghitung nilai fungsi *Gamma*

$$\Gamma \left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) = \Gamma (1,41) = 0,89$$

- Menghitung nilai MTTR

$$MTTR = \beta \Gamma \left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)$$

$$MTTR = 418,07 \times 0,89 = 372,08 \text{ jam} = 15,50 \text{ hari}$$

Berdasarkan hasil analisis distribusi *Weibull* dengan parameter $\alpha = 2,3968$ dan $\beta = 418,07$, diperoleh nilai *Mean Time to Failure* (MTTF) untuk komponen *nozzle* sebesar 372,08 jam atau sekitar 15,50 hari dengan mesin beroperasi 24 jam per hari. Nilai MTTF yang cukup tinggi ini menunjukkan bahwa *nozzle* memiliki tingkat keandalan yang baik, karena rata-rata waktu antar kerusakannya cukup panjang.

2) *Clamping Unit*

Berdasarkan Tabel 4.19, *Clamping unit* memiliki distribusi Normal dengan parameter $\sigma = 285,12$ dan $\mu = 424,52$. Berikut perhitungannya menggunakan Rumus 2.20.

- Menghitung MTTF

$$MTTF = \mu$$

$$MTTF = 424,52 \text{ jam} = 17,68 \text{ hari}$$

Berdasarkan hasil analisis distribusi Normal dengan parameter $\sigma = 285,12$ dan $\mu = 424,52$, diperoleh nilai *Mean Time to Failure* (MTTF) untuk komponen *clamping unit* sebesar 424,52jam atau sekitar 17,68 hari dengan mesin beroperasi 24 jam per hari. Nilai MTTF yang cukup tinggi ini menunjukkan bahwa *clamping unit* memiliki tingkat keandalan yang baik, karena rata-rata waktu antar kerusakannya cukup panjang.

3) *Screw*

Berdasarkan Tabel 4.19, *Screw* memiliki distribusi *Weibull* dengan parameter $\alpha = 1,1593$ dan $\beta = 443,11$. Berikut perhitungannya menggunakan Rumus 2.29.

- Menghitung fungsi *Gamma*

$$MTTF = \beta \Gamma \left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)$$

$$\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) = \left(1 + \frac{1}{1,1593}\right) = 1 + 0,86 = 1,86$$

- Menghitung nilai fungsi *Gamma*

$$\Gamma \left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) = \Gamma (1,86) = 0,95$$

- Menghitung nilai MTTR

$$MTTR = \beta \Gamma \left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)$$

$$MTTR = 443,11 \times 0,95 = 420,95 \text{ jam} = 17,53 \text{ hari}$$

Berdasarkan hasil analisis distribusi *Weibull* dengan parameter $\alpha = 1,1593$ dan $\beta = 443,11$, diperoleh nilai *Mean Time to Failure* (MTTF) untuk komponen *screw* sebesar 420,95 jam atau sekitar 17,53 hari dengan mesin beroperasi 24 jam per hari. Nilai MTTF yang cukup tinggi ini menunjukkan bahwa *nozzle* memiliki tingkat keandalan yang baik, karena rata-rata waktu antar kerusakannya cukup panjang.

4) *Hopper*

Berdasarkan Tabel 4.19, *Hopper* memiliki distribusi Normal dengan parameter $\sigma = 228,87$ dan $\mu = 498,87$. Berikut perhitungannya menggunakan Rumus 2.20.

- Menghitung MTTF

$$\text{MTTF} = \mu$$

$$\text{MTTF} = 498,87 \text{ jam} = 20,78 \text{ hari}$$

Berdasarkan hasil analisis distribusi Normal dengan parameter $\sigma = 228,87$ dan $\mu = 498,87$, diperoleh nilai *Mean Time to Failure* (MTTF) untuk komponen *hopper* sebesar 498,87 jam atau sekitar 20,78 hari dengan mesin beroperasi 24 jam per hari. Nilai MTTF yang cukup tinggi ini menunjukkan bahwa *hopper* memiliki tingkat keandalan yang baik, karena rata-rata waktu antar kerusakannya cukup panjang

3. Rekapitulasi Hasil Perhitungan TTR, TTF, MTTR dan MTTF

Tabel 4. 20 Rekapitulasi Hasil Perhitungan TTR, TTF, MTTR dan MTTF

<i>Part/Process</i>	<i>Distribution</i>	<i>Statistic</i>	<i>Parameter</i>	<i>Hasil</i>
<i>Nozzle</i>	<i>Weibull</i>	0,33906	$\alpha = 2,2851$ $\beta = 0,95313$	MTTR = 0,85 Jam = 51 menit
	<i>Weibull</i>	0,20685	$\alpha = 2,3968$ $\beta = 418,07$	MTTF = 372,08 jam = 15,50 hari
<i>Clamping Unit</i>	Normal	0,2775	$\sigma = 0,32733$ $\mu = 0,5$	MTTR = 0,5 Jam = 30 menit
	Normal	0,18058	$\sigma = 285,12$ $\mu = 424,52$	MTTF = 424,52 jam = 17,68 hari
<i>Screw</i>	Lognormal	0,24383	$\sigma = 0,54109$ $\mu = -0,77979$	MTTR = 0,61 Jam = 37 menit
	<i>Weibull</i>	0,21356	$\alpha = 1,1593$ $\beta = 443,11$	MTTF = 420,95 jam = 17,53 hari
<i>Hopper</i>	Lognormal	0,33333	$\sigma = 0,40019$ $\mu = -0,69315$	MTTR = 0,59 Jam = 35 menit
	Normal	0,249	$\sigma = 228,87$ $\mu = 498,87$	MTTF = 498,87 jam = 20,78 hari

Berdasarkan Tabel 4.20, diketahui bahwa nilai MTTR (*Mean Time To Repair*) tercepat terdapat pada komponen *Clamping Unit* dengan waktu perbaikan rata-rata 0,5 jam atau 30 menit, sedangkan waktu perbaikan terlama terdapat pada *Nozzle* yaitu 0,85 jam atau 51 menit. Hal ini menunjukkan bahwa *Clamping Unit* relatif lebih mudah diperbaiki dibandingkan komponen lainnya. Untuk

nilai MTTF (*Mean Time To Failure*), komponen dengan keandalan tertinggi adalah *Hopper* dengan MTTF sebesar 498,87 jam, diikuti oleh *Clamping Unit* 424,52 jam dan *Screw* 420,95 jam. Sementara itu, komponen *Nozzle* memiliki MTTF terendah yaitu 372,08 jam atau sekitar 15,50 hari. Artinya, *Nozzle* cenderung lebih sering mengalami kerusakan dibandingkan komponen lainnya.

4.1.10 Perhitungan *Reliability* dan Interval Waktu Penggantian Optimal

Setelah dilakukan *plotting* distribusi serta perhitungan TTR, TTF, MTTR, dan MTTF, diperoleh gambaran menyeluruh mengenai pola kerusakan dan keandalan (*reliability*) komponen. Berdasarkan hasil ini, diterapkan model *age replacement* untuk menentukan interval waktu penggantian pencegahan optimal yang bertujuan meminimalkan *downtime*. Penentuannya didasarkan pada nilai $D(tp)$ yaitu probabilitas total *downtime* per unit waktu akibat penggantian pencegahan, di mana nilai terkecil menunjukkan waktu penggantian paling efektif. Berikut merupakan perhitungan untuk setiap komponen kritis.

1. *Nozzle*

Untuk menentukan selang waktu antar kerusakan (tp), diperlukan sejumlah data yang telah diperoleh pada tahap sebelumnya. Data tersebut menjadi dasar dalam menghitung interval penggantian komponen secara optimal.

- a. Data *Mean Time to Failure* (MTTF) berdistribusi *weibull*.

$$MTTF = 372,08 \text{ jam}$$

$$\alpha = 2,3968$$

$$\beta = 418,07$$

- b. Data *Mean Time to Repair* (MTTR).

Berdasarkan hasil perhitungan, waktu perbaikan rata-rata (MTTR) sebesar 0,85 jam atau 51 menit digunakan sebagai waktu perbaikan kerusakan (Tf). Dalam model *age replacement*, Tf disamakan dengan waktu penggantian pencegahan (Tp) karena keduanya melibatkan proses perbaikan yang serupa, baik dari segi durasi maupun tindakan teknis. Dengan demikian, $MTTR = Tf = Tp$.

c. Perhitungan *Reliability* dan *Age Replacement*

Berikut merupakan contoh perhitungan untuk $t_p = 741,35$ jam atau selang waktu antar kerusakan berdasarkan TTF *Nozzle* pada Tabel 4.14. Dengan demikian, $t_p = TTF$.

$$\begin{aligned}
 1. \quad R(t_p) &= \exp\left[-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha\right] \\
 &= \exp\left[-\left(\frac{741,35 \text{ jam}}{418,07}\right)^{2,3968}\right] \\
 &= \exp[-(1,773)^{2,3968}] \\
 &= \exp - 3,945 \\
 &= 0,0193 = 1,93\%
 \end{aligned}$$

Berdasarkan Rumus 2.30, nilai $R(t_p)$ atau *reliability* (probabilitas komponen masih berfungsi hingga waktu pencegahan) untuk *nozzle* yang berdistribusi *weibull* adalah 0,0193. Artinya, peluang *nozzle* tetap berfungsi tanpa gagal hanya 1,93%, menunjukkan keandalan yang sangat rendah dan perlu perhatian khusus.

$$\begin{aligned}
 2. \quad F(t_p) &= 1 - R(t_p) \\
 &= 1 - 0,0193 \\
 &= 0,9807 = 98,07\%
 \end{aligned}$$

Berdasarkan Rumus 2.31, nilai $F(t_p)$ atau fungsi distribusi kumulatif kerusakan untuk komponen *nozzle* yang mengikuti distribusi *Weibull* adalah 0,9807. Artinya, terdapat 98,07% peluang bahwa *nozzle* akan mengalami kerusakan sebelum waktu penggantian pencegahan (T_p) yang telah ditentukan. Hal ini menunjukkan bahwa risiko kegagalan komponen sudah sangat tinggi meskipun belum tentu melewati nilai MTTF, sehingga penggantian pencegahan perlu segera dilakukan untuk mencegah kerusakan secara tiba-tiba.

$$\begin{aligned}
 3. \quad M(t_p) &= \left[\frac{MTTF}{1-R(t_p)} \right] \\
 &= \left[\frac{372,08 \text{ jam}}{1-0,0193} \right] \\
 &= 379,4024 \text{ jam} = 15,81 \text{ hari}
 \end{aligned}$$

Berdasarkan Rumus 2.32, nilai $M(tp)$ atau ekspektasi panjang siklus kerusakan untuk komponen *nozzle* yang mengikuti distribusi *Weibull* adalah 379,4024 jam atau sekitar 15,81 hari. Artinya, jika komponen *nozzle* selalu diganti secara berkala pada waktu pencegahan tertentu (Tp), maka secara rata-rata kerusakan akan terjadi setelah 15,81 hari pemakaian dalam setiap siklus. Nilai ini mencerminkan ekspektasi waktu pakai per siklus sebelum terjadi kerusakan apabila *age replacement* diterapkan.

$$\begin{aligned}
 4. \quad D(tp) &= \frac{Tp.R(tp) + Tf(1-R(tp))}{(tp+Tp)R(tp) + (M(tp) + Tf)(1-R(tp))} \\
 &= \frac{0,85 \text{ jam} \cdot 0,0193 + 0,85 \text{ jam} \cdot 0,9807}{14,3244 \text{ jam} + 380,2524 \text{ jam} \cdot 0,9807} \\
 &= \frac{0,85 \text{ jam}}{387,2380 \text{ jam}} \\
 &= 0,0021950 = 0,22\%
 \end{aligned}$$

Berdasarkan Rumus 2.33, nilai $D(tp)$ dihitung setelah mendapatkan $R(tp)$, $F(tp)$, dan $M(tp)$ untuk komponen *nozzle*. Nilai $D(tp)$ ini menentukan waktu penggantian pencegahan yang paling efektif.

Adapun rekapitulasi nilai *Reliability* dan Interval waktu penggantian komponen mesin *Nozzle* dapat dilihat pada Tabel 4.21 berikut.

Tabel 4. 21 Perhitungan Interval Waktu Penggantian Komponen *Nozzle*

tp (jam)	R (tp)	F (tp)	M (tp) (jam)	D (tp)
741,35	0,0193	0,9807	379,4024	0,0021950
437,15	0,3292	0,6708	554,6810	0,0016446
256,15	0,7350	0,2650	1404,0754	0,0015146
537,55	0,1615	0,8385	443,7447	0,0018488
277,55	0,6886	0,3114	1194,8619	0,0015069
227,15	0,7937	0,2063	1803,5870	0,0016087
277,20	0,6886	0,3114	1194,8619	0,0015075
526,35	0,1762	0,8238	451,6630	0,0018253

Berdasarkan Tabel 4.21, nilai minimum $D(tp)$ sebesar 0,0015069 atau sekitar 0,15% untuk komponen *nozzle* terjadi pada $tp = 277,55$ jam, atau sekitar 11,56 hari dengan mesin beroperasi selama 24 jam sehari. Artinya, hanya 0,15% kemungkinan komponen akan rusak sebelum waktu ini. Dengan demikian, penggantian *nozzle* pada waktu ini dianggap optimal

untuk meminimalkan potensi kerusakan tak terduga dan waktu henti mesin. Oleh karena itu, $t_p = 277,55$ jam atau 11,56 hari dapat ditetapkan sebagai waktu penggantian pencegahan yang optimal.

2. *Clamping Unit*

Untuk menentukan selang waktu antar kerusakan (t_p), diperlukan sejumlah data yang telah diperoleh pada tahap sebelumnya. Data tersebut menjadi dasar dalam menghitung interval penggantian komponen secara optimal.

- a. Data *Mean Time to Failure* (MTTF) berdistribusi Normal.

$$\text{MTTF} = 424,52 \text{ jam}$$

$$\mu = 424,52$$

$$\sigma = 285,12$$

- b. Data *Mean Time to Repair* (MTTR).

Berdasarkan hasil perhitungan, waktu perbaikan rata-rata (MTTR) sebesar 0,5 jam digunakan sebagai waktu perbaikan kerusakan (T_f). Dalam model *age replacement*, T_f disamakan dengan waktu penggantian pencegahan (T_p) karena keduanya melibatkan proses perbaikan yang serupa, baik dari segi durasi maupun tindakan teknis. Dengan demikian, $\text{MTTR} = T_f = T_p$.

- c. Perhitungan *Reliability* dan *Age Replacement*

Berikut merupakan contoh perhitungan untuk $t_p = 404$ jam atau selang waktu antar kerusakan berdasarkan TTF *Clamping Unit* pada Tabel 4.15. Dengan demikian, $t_p = \text{TTF}$.

$$\begin{aligned} 1. \quad F(t_p) &= \Phi \left[\frac{t - \mu}{\sigma} \right] \\ &= \Phi \left[\frac{404 \text{ jam} - 424,52}{285,12} \right] \\ &= \Phi (-0,07) \\ &= 0,4721 = 47,21 \% \end{aligned}$$

Berdasarkan Rumus 2.22, nilai $F(t_p)$ atau fungsi distribusi kumulatif kerusakan untuk komponen *clamping unit* yang mengikuti distribusi Normal adalah 0,4721. Artinya, terdapat 47,21% kemungkinan *clamping unit* akan mengalami kerusakan sebelum waktu penggantian pencegahan (T_p). Nilai ini menunjukkan bahwa risiko kegagalan

berada pada tingkat sedang, sehingga tetap perlu diwaspadai untuk mencegah potensi *downtime*.

$$\begin{aligned}
 2. \quad R(tp) &= 1 - \phi \left[\frac{t - \mu}{\sigma} \right] \\
 &= 1 - 0,4721 \\
 &= 0,5279 = 52,79 \%
 \end{aligned}$$

Berdasarkan Rumus 2.21, nilai $R(tp)$ atau *reliability* (probabilitas komponen masih berfungsi hingga waktu pencegahan) untuk *clamping unit* yang berdistribusi normal adalah 0,5279. Artinya, peluang *clamping unit* tetap berfungsi tanpa gagal hanya 52,79%, menunjukkan keandalan yang sedang dan perlu perhatian khusus.

$$\begin{aligned}
 3. \quad M(tp) &= \left[\frac{MTTF}{1 - R(tp)} \right] \\
 &= \left[\frac{424,52 \text{ jam}}{1 - 0,5279} \right] \\
 &= 899,2162 \text{ jam} = 37,47 \text{ hari}
 \end{aligned}$$

Berdasarkan Rumus 2.32, nilai $M(tp)$ atau ekspektasi panjang siklus kerusakan untuk komponen *clamping unit* yang mengikuti distribusi Normal adalah 899,2162 jam atau sekitar 37,47 hari. Artinya, jika komponen *clamping unit* selalu diganti secara berkala pada waktu pencegahan tertentu (T_p), maka secara rata-rata kerusakan akan terjadi setelah 37,47 hari pemakaian dalam setiap siklus. Nilai ini mencerminkan ekspektasi waktu pakai per siklus sebelum terjadi kerusakan apabila strategi *age replacement* diterapkan.

$$\begin{aligned}
 4. \quad D(tp) &= \frac{T_p R(tp) + T_f (1 - R(tp))}{(tp + T_p) R(tp) + (M(tp) + T_f)(1 - R(tp))} \\
 &= \frac{0,5 \text{ jam} \cdot 0,5279 + 0,5 \text{ jam} \cdot 0,4721}{213,5356 \text{ jam} + 899,2162 \text{ jam} \cdot 0,4721} \\
 &= \frac{0,5 \text{ jam}}{638,2916 \text{ jam}} \\
 &= 0,0007833 = 0,07 \%
 \end{aligned}$$

Berdasarkan Rumus 2.33, nilai $D(tp)$ dihitung setelah mendapatkan $F(tp)$, $R(tp)$, dan $M(tp)$ untuk komponen *clamping unit*. Nilai $D(tp)$ ini menentukan waktu penggantian pencegahan yang paling efektif.

Adapun rekapitulasi nilai *Reliability* dan Interval waktu penggantian komponen mesin *Clamping unit* dapat dilihat pada Tabel 4.22 berikut.

Tabel 4. 22 Perhitungan Interval Waktu Penggantian Komponen *Clamping Unit*

tp (jam)	F (tp)	R (tp)	M (tp) (jam)	D (tp)
404	0,4721	0,5279	899,2162	0,0007833
600,10	0,7291	0,2709	582,2521	0,0008505
124,45	0,1469	0,8531	497,6204	0,0011279
400,40	0,4681	0,5319	906,9002	0,0007837
49	0,0951	0,9049	4463,9327	0,0010652
892,50	0,9495	0,0505	447,5984	0,0010636
501,20	0,6026	0,3974	704,4805	0,0008010

Berdasarkan Tabel 4.22, nilai minimum $D(tp)$ sebesar 0,0007833 atau sekitar 0,07% untuk komponen *clamping unit* terjadi pada $tp = 404$ jam, atau sekitar 16,83 hari dengan mesin beroperasi selama 24 jam sehari. Artinya, hanya 0,07% kemungkinan komponen akan rusak sebelum waktu ini. Dengan demikian, penggantian *clamping unit* pada waktu ini dianggap optimal untuk meminimalkan potensi kerusakan tak terduga dan waktu henti mesin. Oleh karena itu, $tp = 404$ jam atau 16,83 hari dapat ditetapkan sebagai waktu penggantian pencegahan yang optimal.

3. *Screw*

Untuk menentukan selang waktu antar kerusakan (tp), diperlukan sejumlah data yang telah diperoleh pada tahap sebelumnya. Data tersebut menjadi dasar dalam menghitung interval penggantian komponen secara optimal.

- a. Data *Mean Time to Failure* (MTTF) berdistribusi *weibull*.

$$MTTF = 420,95$$

$$\alpha = 1,1593$$

$$\beta = 443,11$$

- b. Data *Mean Time to Repair* (MTTR).

Berdasarkan hasil perhitungan, waktu perbaikan rata-rata (MTTR) sebesar 0,61 jam digunakan sebagai waktu perbaikan kerusakan (Tf). Dalam model *age replacement*, Tf disamakan dengan waktu penggantian pencegahan (Tp) karena keduanya melibatkan proses perbaikan yang

serupa, baik dari segi durasi maupun tindakan teknis. Dengan demikian, $MTTR = T_f = T_p$.

c. Perhitungan *Reliability* dan *Age Replacement*

Berikut merupakan contoh perhitungan untuk $t_p = 129,50$ jam atau selang waktu antar kerusakan berdasarkan TTF *Screw* pada Tabel 4.16. Dengan demikian, $t_p = TTF$.

$$\begin{aligned}
 1. \quad R(t_p) &= \exp\left[-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha\right] \\
 &= \exp\left[-\left(\frac{129,50 \text{ jam}}{443,11}\right)^{1,1593}\right] \\
 &= \exp\left[-(0,292)^{1,1593}\right] \\
 &= \exp - 0,240 \\
 &= 0,7866 = 78,66 \%
 \end{aligned}$$

Berdasarkan Rumus 2.30, nilai $R(t_p)$ atau *reliability* (probabilitas komponen masih berfungsi hingga waktu pencegahan) untuk *screw* yang berdistribusi *weibull* adalah 0,7866. Artinya, peluang *screw* tetap berfungsi tanpa gagal 78,66%, menunjukkan keandalan yang tinggi dan masih cukup andal.

$$\begin{aligned}
 2. \quad F(t_p) &= 1 - R(t_p) \\
 &= 1 - 0,7866 \\
 &= 0,2134 = 21,34 \%
 \end{aligned}$$

Berdasarkan Rumus 2.31, nilai $F(t_p)$ atau fungsi distribusi kumulatif kerusakan untuk komponen *screw*, yang mengikuti distribusi *Weibull*, adalah 0,2134. Artinya, terdapat 21,34% kemungkinan *screw* akan mengalami kerusakan sebelum waktu penggantian pencegahan (T_p). Nilai ini mengindikasikan bahwa risiko kegagalan masih tergolong rendah hingga sedang, namun tetap perlu diwaspadai agar tidak berdampak pada kelancaran proses produksi.

$$\begin{aligned}
 3. \quad M(t_p) &= \left[\frac{MTTF}{1 - R(t_p)} \right] \\
 &= \left[\frac{420,95 \text{ jam}}{1 - 0,7866} \right] \\
 &= 1972,5867 \text{ jam} = 82,19 \text{ hari}
 \end{aligned}$$

Berdasarkan Rumus 2.32, nilai $M(tp)$ atau ekspektasi panjang siklus kerusakan untuk komponen *screw* yang mengikuti distribusi *Weibull* adalah 1972,5867 jam atau sekitar 82,19 hari. Artinya, jika komponen *screw* selalu diganti secara berkala pada waktu pencegahan tertentu (Tp), maka secara rata-rata kerusakan akan terjadi setelah 82,19 hari pemakaian dalam setiap siklus. Nilai ini mencerminkan ekspektasi waktu pakai per siklus sebelum terjadi kerusakan apabila strategi *age replacement* diterapkan.

$$\begin{aligned}
 4. \quad D(tp) &= \frac{Tp \cdot R(tp) + Tf(1 - R(tp))}{(tp + Tp)R(tp) + (M(tp) + Tf)(1 - R(tp))} \\
 &= \frac{0,61 \text{ jam} \cdot 0,7866 + 0,61 \text{ jam} \cdot 0,2134}{102,3445 \text{ jam} + 1973,1967 \text{ jam} \cdot 0,2134} \\
 &= \frac{0,61 \text{ jam}}{523,4246 \text{ jam}} \\
 &= 0,0011654 = 0,1\%
 \end{aligned}$$

Berdasarkan Rumus 2.33, nilai $D(tp)$ dihitung setelah mendapatkan $F(tp)$, $R(tp)$, dan $M(tp)$ untuk komponen *screw*. Nilai $D(tp)$ ini menentukan waktu penggantian pencegahan yang paling efektif.

Adapun rekapitulasi nilai *Reliability* dan Interval waktu penggantian komponen mesin *Screw* dapat dilihat pada Tabel 4.23 berikut.

Tabel 4. 23 Perhitungan Interval Waktu Penggantian Komponen Screw

tp (jam)	R (tp)	F (tp)	M (tp) (jam)	D (tp)
129,50	0,7866	0,2134	1972,5867	0,0011654
382,25	0,4312	0,5688	740,0688	0,0010402
150,35	0,7512	0,2488	1691,9212	0,0011412
597,50	0,2434	0,7566	556,3706	0,0010758
962,55	0,0856	0,9144	460,3565	0,0012104
786,40	0,1432	0,8568	491,9148	0,0011419
191,05	0,6866	0,3134	1343,1716	0,0011036

Berdasarkan Tabel 4.23, nilai minimum $D(tp)$ sebesar 0,0010402 atau sekitar 0,1% untuk komponen *screw* terjadi pada $tp = 382,25$ jam, atau sekitar 15,92 hari dengan mesin beroperasi selama 24 jam sehari. Artinya, hanya 0,1% kemungkinan komponen akan rusak sebelum waktu ini. Dengan demikian, penggantian *screw* pada waktu ini dianggap optimal untuk meminimalkan potensi kerusakan tak terduga dan waktu henti

mesin. Oleh karena itu, $t_p = 382,25$ jam atau 15,92 hari dapat ditetapkan sebagai waktu penggantian pencegahan yang optimal.

4. *Hopper*

Untuk menentukan selang waktu antar kerusakan (t_p), diperlukan sejumlah data yang telah diperoleh pada tahap sebelumnya. Data tersebut menjadi dasar dalam menghitung interval penggantian komponen secara optimal.

- a. Data *Mean Time to Failure* (MTTF) berdistribusi normal.

$$\text{MTTF} = 498,87 \text{ jam}$$

$$\mu = 498,87$$

$$\sigma = 228,87$$

- b. Data *Mean Time to Repair* (MTTR).

Berdasarkan hasil perhitungan, waktu perbaikan rata-rata (MTTR) sebesar 0,59 jam digunakan sebagai waktu perbaikan kerusakan (T_f). Dalam model *age replacement*, T_f disamakan dengan waktu penggantian pencegahan (T_p) karena keduanya melibatkan proses perbaikan yang serupa, baik dari segi durasi maupun tindakan teknis. Dengan demikian, $\text{MTTR} = T_f = T_p$.

- c. Perhitungan *Reliability* dan *Age Replacement*

Berikut merupakan contoh perhitungan untuk $t_p = 765,40$ jam atau selang waktu antar kerusakan berdasarkan TTF *Hopper* pada Tabel 4.17. Dengan demikian, $t_p = \text{TTF}$

$$\begin{aligned} 1. \quad F(t_p) &= \Phi \left[\frac{t - \mu}{\sigma} \right] \\ &= \Phi \left[\frac{765,40 \text{ jam} - 498,87}{228,87} \right] \\ &= \Phi(1,16) \\ &= 0,8770 = 87,70 \% \end{aligned}$$

Berdasarkan Rumus 2.22, nilai $F(t_p)$ atau fungsi distribusi kumulatif kerusakan untuk komponen *hopper*, yang mengikuti distribusi Normal, adalah 0,8770. Artinya, terdapat 87,70% kemungkinan *hopper* mengalami kerusakan sebelum waktu penggantian pencegahan (T_p). Nilai ini menunjukkan bahwa risiko kegagalannya

sangat tinggi, sehingga penggantian pencegahan sebaiknya segera dilakukan untuk menghindari kerusakan secara tiba-tiba.

$$\begin{aligned}
 2. \quad R(tp) &= 1 - \Phi \left[\frac{t - \mu}{\sigma} \right] \\
 &= 1 - 0,8770 \\
 &= 0,1230 = 12,30\%
 \end{aligned}$$

Berdasarkan Rumus 2.21, nilai $R(tp)$ atau *reliability* (probabilitas komponen masih berfungsi hingga waktu pencegahan) untuk *hopper* yang berdistribusi normal adalah 0,1230. Artinya, peluang *hopper* tetap berfungsi tanpa gagal hanya 12,30%, menunjukkan keandalan yang sangat rendah dan harus dilakukan penggantian.

$$\begin{aligned}
 3. \quad M(tp) &= \left[\frac{MTTF}{1 - R(tp)} \right] \\
 &= \left[\frac{498,87 \text{ jam}}{1 - 0,1230} \right] \\
 &= 568,8370 \text{ jam} = 23,70 \text{ hari}
 \end{aligned}$$

Berdasarkan Rumus 2.32, nilai $M(tp)$ atau ekspektasi panjang siklus kerusakan untuk komponen *hopper* yang mengikuti distribusi *Weibull* adalah 568,8370 jam atau sekitar 23,70 hari. Artinya, jika komponen *hopper* selalu diganti secara berkala pada waktu pencegahan tertentu (T_p), maka secara rata-rata kerusakan akan terjadi setelah 23,70 hari pemakaian dalam setiap siklus. Nilai ini mencerminkan ekspektasi waktu pakai per siklus sebelum terjadi kerusakan.

$$\begin{aligned}
 4. \quad D(tp) &= \frac{T_p R(tp) + T_f (1 - R(tp))}{(T_p + T_p) R(tp) + (M(tp) + T_f)(1 - R(tp))} \\
 &= \frac{0,59 \text{ jam} \cdot 0,1230 + 0,59 \text{ jam} \cdot 0,8770}{94,2168 \text{ jam} + 569,427 \text{ jam} \cdot 0,8770} \\
 &= \frac{0,59 \text{ jam}}{593,6042 \text{ jam}} \\
 &= 0,0009940 = 0,1 \%
 \end{aligned}$$

Berdasarkan Rumus 2.33, nilai $D(tp)$ dihitung setelah mendapatkan $F(tp)$, $R(tp)$, dan $M(tp)$ untuk komponen *hopper*. Nilai $D(tp)$ ini menentukan waktu penggantian pencegahan yang paling efektif.

Adapun rekapitulasi nilai *Reliability* dan Interval waktu penggantian komponen mesin *Hopper* dapat dilihat pada Tabel 4.24 berikut.

Tabel 4. 24 Perhitungan Interval Waktu Penggantian Komponen *Hopper*

tp (jam)	F (tp)	R (tp)	M (tp) (jam)	D (tp)
765,40	0,8770	0,1230	568,8370	0,0009940
722,15	0,8340	0,1660	598,1654	0,0009526
292,10	0,1841	0,8159	2709,7772	0,0007996
303,40	0,1977	0,8023	2523,3687	0,0007942
411,30	0,3520	0,6480	1417,2443	0,0007706

Berdasarkan Tabel 4.24, nilai minimum D(tp) sebesar 0,0007706 atau sekitar 0,07% untuk komponen *hopper* terjadi pada tp = 411,30 jam, atau sekitar 17,13 hari dengan mesin beroperasi selama 24 jam sehari. Artinya, hanya 0,07% kemungkinan komponen akan rusak sebelum waktu ini. Dengan demikian, penggantian *hopper* pada waktu ini dianggap optimal untuk meminimalkan potensi kerusakan tak terduga dan waktu henti mesin. Oleh karena itu, tp = 411,30 jam atau 17,13 hari dapat ditetapkan sebagai waktu penggantian pencegahan yang optimal.

Berikut disajikan rekapitulasi perhitungan interval penggantian pencegahan untuk setiap komponen kritis.

Tabel 4. 25 Rekapitulasi Perhitungan Interval Waktu

Nama Komponen	Jadwal Penggantian Pencegahan Komponen
<i>Nozzle</i>	277,55 Jam = 11,56 Hari
<i>Clamping Unit</i>	404 Jam = 16,83 Hari
<i>Screw</i>	382,25 Jam = 15,92 Hari
<i>Hopper</i>	411,30 Jam = 17,13 Hari

Berdasarkan Tabel 4.25, hasil perhitungan nilai D(tp) menunjukkan bahwa setiap komponen pada mesin memiliki interval penggantian pencegahan (*preventive replacement*) yang berbeda-beda. Sebagai contoh, komponen *nozzle* memiliki interval optimal sebesar 11,56 hari.

- Jumlah penggantian/24 hari = $\frac{24 \text{ hari}}{11,56 \text{ hari}} = 2,08 \approx 2$ kali
- Jumlah penggantian/144 hari = $\frac{144 \text{ hari}}{11,56 \text{ hari}} = 12,46 \approx 12$ kali

Angka 24 hari merujuk pada jumlah hari kerja mesin dalam satu bulan, yaitu 6 hari per minggu selama 4 minggu. Sedangkan 144 hari merupakan akumulasi total hari kerja mesin selama periode enam bulan. Oleh karena itu, berikut disajikan interval waktu penggantian preventif untuk masing-masing komponen pada Tabel 2.26.

Tabel 4. 26 Interval Waktu Penggantian Pencegahan

Nama Komponen	Interval Penggantian (hari)	Jumlah penggantian per 24 hari	Jumlah penggantian per 144 hari
<i>Nozzle</i>	11,56 Hari	2,08 = 2 kali	12,46 = 12 – 13 kali
<i>Clamping Unit</i>	16,83 Hari	1,43 = 1 – 2 kali	8,56 = 9 kali
<i>Screw</i>	15,92 Hari	1,51 = 2 kali	9,05 = 9 kali
<i>Hopper</i>	17,13 Hari	1,40 = 1 – 2 kali	8,40 = 8 – 9 kali

4.1.11 Analisis Biaya

Perhitungan analisis biaya dilakukan untuk menentukan semua biaya terkait pemeliharaan pencegahan guna mencegah kegagalan mesin. Biaya ini mencakup berbagai aspek yang diperlukan agar mesin tetap beroperasi secara optimal dan menghindari *downtime* yang tidak terduga.

1. *Cost of Failure*

Cost of Failure (Cf) adalah biaya yang muncul saat mesin mengalami kerusakan hingga menghentikan proses produksi. Perhitungan Cf mencakup beberapa komponen biaya, yaitu pembelian suku cadang (*part*), biaya teknisi, biaya operator yang menganggur selama mesin henti, serta potensi keuntungan yang hilang. Berikut ini adalah perhitungan Cf untuk setiap komponen kritis.

a. Biaya Pembelian *Part*

Berdasarkan Rumus 2.1, biaya pembelian *part* untuk setiap komponen kritis dihitung dengan mengalikan harga satuan *part* dengan jumlah unit yang dibutuhkan, yang diperoleh dari total jumlah kerusakan selama periode Juli hingga Desember 2024. Pada Tabel 4.27 berikut merupakan hasil perhitungannya.

Tabel 4. 27 Biaya Pembelian *Part*

Nama Komponen	<i>Part</i> yang Bermasalah	Harga/unit (Rp)	Total Kerusakan	Total Biaya Beli <i>Part</i> (Rp)
<i>Nozzle</i>	<i>Nozzle Tip</i>	327.871	9 kali	2.950.845
<i>Clamping Unit</i>	Selang Hidrolik	310.000	8 kali	2.480.000
<i>Screw</i>	<i>Screw Tip Seal</i>	444.000	8 kali	3.552.000
<i>Hopper</i>	<i>Screen Hopper</i>	579.265	6 kali	3.475.590

b. Biaya Teknisi

Berhubungan dengan gaji karyawan yang bertugas langsung melakukan penggantian. Perhitungannya adalah sebagai berikut:

- Biaya tenaga kerja/bulan/orang = Rp. 2.288.366/bulan
- Biaya tenaga kerja/hari/orang = Rp. 95.348/hari/24 jam

Berdasarkan Rumus 2.2, biaya teknisi untuk setiap komponen kritis dihitung dengan mengalikan rata-rata waktu perbaikan (MTTR) dengan biaya tenaga kerja per hari, jumlah teknisi yang terlibat, serta jumlah unit kerusakan yang terjadi selama periode Juli hingga Desember 2024. Pada Tabel 4.28 berikut merupakan hasil perhitungannya.

Tabel 4. 28 Biaya Teknisi

Nama Komponen	MTTR (jam)	Biaya Teknisi perhari (Rp)	Total Kerusakan	Jumlah Teknisi	Total Biaya Teknisi (Rp)
<i>Nozzle</i>	0,85	95.348	9 kali	2 orang	1.458.824
<i>Clamping Unit</i>	0,5	95.348	8 kali	2 orang	762.784
<i>Screw</i>	0,61	95.348	8 kali	2 orang	930.592
<i>Hopper</i>	0,59	95.348	6 kali	2 orang	675.060

c. Biaya Operator Menganggur

Berhubungan dengan gaji operator yang bertugas dalam operasional mesin. Perhitungannya adalah sebagai berikut:

- Jumlah tenaga kerja = 3 orang
- Biaya tenaga kerja/bulan/orang = Rp. 2.288.366/bulan
- Biaya tenaga kerja/hari/orang = Rp. 95.348/hari/24 jam
- Biaya tenaga kerja/jam/orang = Rp. 13.621/jam

Berdasarkan Rumus 2.3, biaya operator menganggur untuk setiap komponen kritis dihitung dengan mengalikan rata-rata waktu perbaikan (MTTR) dengan biaya tenaga kerja per jam, jumlah teknisi yang terlibat,

serta jumlah unit kerusakan yang terjadi selama periode Juli hingga Desember 2024. Pada Tabel 4.29 berikut merupakan hasil perhitungannya.

Tabel 4. 29 Biaya Operator Menganggur

Nama Komponen	MTTR (jam)	Biaya Operator perhari (Rp)	Total Kerusakan	Jumlah operator	Total Biaya Teknisi (Rp)
<i>Nozzle</i>	0,85	13.621	9 kali	3 orang	312.601
<i>Clamping Unit</i>	0,5	13.621	8 kali	3 orang	163.448
<i>Screw</i>	0,61	13.621	8 kali	3 orang	199.408
<i>Hopper</i>	0,59	13.621	6 kali	3 orang	144.654

d. **Keuntungan Yang Hilang**

Biaya kehilangan produksi didasarkan atas *output* dan laba yang seharusnya diperoleh. Berdasarkan Rumus 2.4, berikut merupakan hasil perhitungan untuk biaya total biaya keuntungan yang hilang yang ditunjukkan Tabel 4.30.

- *Output*/hari = 900 unit/3 *shift*/24 jam
= 38 unit/jam
- Laba/unit = Rp. 35.000/unit

Tabel 4. 30 Biaya Keuntungan yang Hilang

Nama Komponen	MTTR (jam)	Total Kerusakan	<i>Output</i> perhari (unit)	Laba/unit (Rp)	Total Biaya (Rp)
<i>Nozzle</i>	0,85	9 kali	38	35.000	10.185.000
<i>Clamping Unit</i>	0,5	8 kali	38	35.000	5.320.000
<i>Screw</i>	0,61	8 kali	38	35.000	6.510.000
<i>Hopper</i>	0,59	6 kali	38	35.000	4.725.000

e. ***Cost of Failure (Cf)***

Berdasarkan Rumus 2.5, setelah diperoleh nilai biaya pembelian *part*, biaya teknisi, biaya operator menganggur, serta estimasi kerugian akibat hilangnya keuntungan, maka dilakukan perhitungan *Cost of Failure (Cf)* untuk setiap komponen kritis. Pada Tabel 4.31 berikut merupakan hasil perhitungannya.

Tabel 4. 31 *Cost of Failure*

Nama Komponen	Biaya Pembelian Part (Rp)	Biaya Teknisi (Rp)	Biaya Operator Menganggur (Rp)	Keuntungan yang hilang (Rp)	<i>Cost of Failure</i> (Rp)
Nozzle	2.950.000	1.458.824	312.601	10.185.000	14.906.425
Clamping Unit	2.480.000	762.784	164.448	5.320.000	8.726.232
Screw	3.552.000	930.592	199.408	6.510.000	11.192.000
Hopper	3.475.590	675.060	144.654	4.725.000	9.020.304

2. *Cost of Preventive*

Cost of Preventive (Cp) merupakan biaya yang dikeluarkan untuk mengganti atau merawat komponen sebelum terjadi kerusakan guna mencegah terjadinya gangguan pada proses produksi. Biaya ini bersifat antisipatif dan umumnya lebih rendah dibandingkan *Cost of Failure* (Cf) yang timbul akibat kerusakan. Cp mencakup dua komponen biaya utama, yaitu biaya pembelian *part* dan biaya teknisi. Biaya pembelian *part* dan biaya teknisi juga dihitung dalam Cf, tetapi konteksnya berbeda. Pada Cf, biaya tersebut dikeluarkan setelah kerusakan terjadi, sehingga bersifat korektif. Sedangkan dalam Cp, biaya serupa dihitung untuk skenario penggantian sebelum komponen mengalami kegagalan, sehingga bersifat preventif. Oleh karena itu, perhitungan Cp dan Cf dilakukan secara terpisah, meskipun elemen biayanya serupa.

Berdasarkan Rumus 2.8 dan merujuk pada hasil perhitungan biaya pembelian *part* dan biaya teknisi pada *Cost of Failure* (Cf), berikut disajikan perhitungan *Cost of Preventive* (Cp) untuk masing-masing komponen kritis pada Tabel 4.32.

Tabel 4. 32 *Cost of Preventive*

Nama Komponen	Biaya Pembelian Part (Rp)	Biaya Teknisi (Rp)	<i>Cost of Preventive</i> (Rp)
Nozzle	2.950.000	1.458.824	4.408.824
Clamping Unit	2.480.000	762.784	3.242.784
Screw	3.552.000	930.592	4.482.592
Hopper	3.475.590	675.060	4.150.650

3. Rekapitulasi Analisis Biaya

Berikut disajikan rekapitulasi analisis biaya untuk setiap komponen kritis.

Tabel 4. 33 Rekapitulasi Analisis Biaya

Nama Komponen	Cost of Failure (Rp)	Cost of Preventive (Rp)
Nozzle	14.906.425	4.408.824
Clamping Unit	8.726.232	3.242.784
Screw	11.192.000	4.482.592
Hopper	9.020.304	4.150.650

Tabel 4.33 menunjukkan bahwa biaya kerusakan (*cost of failure*) jauh lebih tinggi dibandingkan biaya penggantian pencegahan (*cost of preventive*) pada semua komponen kritis. Artinya, melakukan penggantian secara rutin sebelum kerusakan terjadi lebih hemat dan efisien dibanding menunggu hingga terjadi kegagalan. Strategi ini penting untuk mengurangi biaya perbaikan dan mencegah *downtime* produksi.

4.1.12 Perhitungan Interval Biaya Penggantian Komponen

Perhitungan biaya penggantian pencegahan menggunakan model *age replacement* bertujuan untuk meminimalkan total biaya perawatan, yang dinotasikan sebagai $C(tp)$, dengan tp sebagai interval waktu penggantian pencegahan. Model ini membantu menentukan waktu penggantian paling efisien secara biaya, agar kerusakan tidak terjadi sebelum jadwal penggantian tiba. Berikut adalah hasil perhitungan $C(tp)$ untuk masing-masing komponen kritis.

1. Nozzle

Berdasarkan hasil perhitungan *reliability* dan interval penggantian optimal komponen *nozzle* yang berdistribusi *Weibull*, serta setelah diketahui nilai C_p dan C_f yang tertera pada Tabel 4.33, dilakukan perhitungan interval biaya penggantian komponen. Perhitungan ini mengacu pada Rumus 2.34 dan digunakan untuk menentukan nilai $C(tp)$, yaitu biaya rata-rata per satuan waktu yang mencerminkan efisiensi biaya dari tindakan penggantian pencegahan.

Berikut merupakan contoh perhitungan untuk $tp = 741,35$ jam berdasarkan TTF *Nozzle* pada Tabel 4.14

$$\begin{aligned}
 C(tp) &= \frac{C_p R(tp) + C_f (1 - R(tp))}{(tp + T_p) R(tp) + (M(tp) + T_f)(1 - R(tp))} \\
 &= \frac{Rp\ 4.408.824 \cdot 0,0193 + Rp\ 14.906.425 \cdot 0,9807}{14,3244\ jam + 380,2524\ jam \cdot 0,9807} \\
 &= \frac{Rp\ 85.090,3032 + Rp\ 14.618.730,9975}{387,2380\ jam}
 \end{aligned}$$

$$= \text{Rp } 37.971/\text{jam}$$

Nilai $C(tp)$ dihitung setelah mendapatkan $R(tp)$, $F(tp)$, dan $M(tp)$ untuk komponen *nozzle*. Nilai $C(tp)$ ini menentukan biaya penggantian pencegahan yang paling efektif.

Adapun rekapitulasi nilai interval biaya penggantian komponen mesin *Nozzle* dapat dilihat pada Tabel 4.34 berikut.

Tabel 4. 34 Interval Biaya Penggantian Komponen *Nozzle*

tp (jam)	R (tp)	F (tp)	M (tp) (jam)	D (tp)	C (tp) (Rp)
741,35	0,0193	0,9807	379,4024	0,0021950	37.971
437,15	0,3292	0,6708	554,6810	0,0016446	22.155
256,15	0,7350	0,2650	1404,0754	0,0015146	12.813
537,55	0,1615	0,8385	443,7447	0,0018488	28.735
277,55	0,6886	0,3114	1194,8619	0,0015069	13.611
227,15	0,7937	0,2063	1803,5870	0,0016087	11.884
277,20	0,6886	0,3114	1194,8619	0,0015075	13.617
526,35	0,1762	0,8238	451,6630	0,0018253	28.004

Berdasarkan Tabel 4.34, nilai minimum $D(tp)$ sebesar 0,0015069 atau 0,15% untuk komponen *nozzle* terjadi pada $tp = 277,55$ jam atau sekitar 11,56 hari dengan mesin beroperasi 24 jam/hari. Pada waktu ini, nilai $C(tp)$ tercatat sebesar Rp 13.611/jam. Hal ini menunjukkan bahwa penggantian *nozzle* setiap 277,55 jam atau 11,56 hari mampu meminimalkan *downtime* dan sekaligus mengoptimalkan biaya perawatan rata-rata per jam operasi mesin. Oleh karena itu, $tp = 277,55$ jam atau 11,56 hari ditetapkan sebagai interval penggantian pencegahan yang paling efisien, baik dari segi teknis maupun finansial.

2. *Clamping Unit*

Berdasarkan hasil perhitungan *reliability* dan interval penggantian optimal komponen *clamping unit* yang berdistribusi normal, serta setelah diketahui nilai C_p dan C_f yang tertera pada Tabel 4.33, dilakukan perhitungan interval biaya penggantian komponen. Perhitungan ini mengacu pada Rumus 2.34 dan digunakan untuk menentukan nilai $C(tp)$, yaitu biaya rata-rata per satuan waktu yang mencerminkan efisiensi biaya dari tindakan penggantian pencegahan.

Berikut merupakan contoh perhitungan untuk $tp = 404$ jam berdasarkan TTF *clamping unit* pada Tabel 4.15

$$\begin{aligned}
C(tp) &= \frac{C_p R(tp) + C_f (1 - R(tp))}{(tp + T_p) R(tp) + (M(tp) + T_f)(1 - R(tp))} \\
&= \frac{Rp\ 3.242.784 \cdot 0,5279 + Rp\ 8.726.232 \cdot 0,4721}{213,5356\ jam + 899,7162\ jam \cdot 0,4721} \\
&= \frac{Rp\ 1.711.865,6736 + Rp\ 4.119.654,1272}{638,2916\ jam} \\
&= Rp\ 9.136/jam
\end{aligned}$$

Nilai $C(tp)$ dihitung setelah mendapatkan $R(tp)$, $F(tp)$, dan $M(tp)$ untuk komponen *clamping unit*. Nilai $C(tp)$ ini menentukan biaya penggantian pencegahan yang paling efektif.

Adapun rekapitulasi nilai interval biaya penggantian komponen mesin *clamping unit* dapat dilihat pada Tabel 4.35 berikut.

Tabel 4. 35 Interval Biaya Penggantian Komponen *Clamping unit*

tp (jam)	F (tp)	R (tp)	M (tp) (jam)	D (tp)	C (tp) (Rp)
404	0,4721	0,5279	899,2162	0,0007833	9.136
600,10	0,7291	0,2709	582,2521	0,0008505	12.322
124,45	0,1469	0,8531	497,6204	0,0011279	17.867
400,40	0,4681	0,5319	906,9002	0,0007837	9.106
49	0,0951	0,9049	4463,9327	0,0010652	8.019
892,50	0,9495	0,0505	447,5984	0,0010636	17.973
501,20	0,6026	0,3974	704,4805	0,0008010	10.488

Berdasarkan Tabel 4.35, nilai minimum $D(tp)$ sebesar 0,0007833 atau 0,07% untuk komponen *clamping unit* terjadi pada $tp = 404$ jam atau sekitar 16,83 hari dengan mesin beroperasi 24 jam/hari. Pada waktu ini, nilai $C(tp)$ tercatat sebesar Rp 9.136/jam. Hal ini menunjukkan bahwa penggantian *clamping unit* setiap 404 jam atau 16,83 hari mampu meminimalkan *downtime* dan sekaligus mengoptimalkan biaya perawatan rata-rata per jam operasi mesin. Oleh karena itu, $tp = 404$ jam atau 16,83 hari ditetapkan sebagai interval penggantian pencegahan yang paling efisien, baik dari segi teknis maupun finansial.

3. *Screw*

Berdasarkan hasil perhitungan *reliability* dan interval penggantian optimal komponen *screw* yang berdistribusi *weibull*, serta setelah diketahui nilai C_p dan C_f yang tertera pada Tabel 4.33, dilakukan perhitungan interval biaya penggantian komponen. Perhitungan ini mengacu pada Rumus 2.34 dan

digunakan untuk menentukan nilai $C(tp)$, yaitu biaya rata-rata per satuan waktu yang mencerminkan efisiensi biaya dari tindakan penggantian pencegahan.

Berikut merupakan contoh perhitungan untuk $tp = 129,50$ jam berdasarkan TTF *screw* pada Tabel 4.16.

$$\begin{aligned}
 C(tp) &= \frac{C_p.R(tp) + C_f(1-R(tp))}{(tp + T_p)R(tp) + (M(tp) + T_f)(1-R(tp))} \\
 &= \frac{Rp\ 4.482.592 \cdot 0,7866 + Rp\ 11.192.000 \cdot 0,2134}{102,3445\ jam + 1973,1967\ jam \cdot 0,2134} \\
 &= \frac{Rp\ 3.526.006,8672 + Rp\ 2.388.372,8}{523,4246\ jam} \\
 &= Rp\ 11.299/jam
 \end{aligned}$$

Nilai $C(tp)$ dihitung setelah mendapatkan $R(tp)$, $F(tp)$, dan $M(tp)$ untuk komponen *screw*. Nilai $C(tp)$ ini menentukan biaya penggantian pencegahan yang paling efektif.

Adapun rekapitulasi nilai interval biaya penggantian komponen mesin *screw* dapat dilihat pada Tabel 4.36 berikut.

Tabel 4. 36 Interval Biaya Penggantian Komponen *Screw*

tp (jam)	R (tp)	F (tp)	M (tp) (jam)	D (tp)	C (tp) (Rp)
129,50	0,7866	0,2134	1972,5867	0,0011654	11.299
382,25	0,4312	0,5688	740,0688	0,0010402	14.152
150,35	0,7512	0,2488	1691,9212	0,0011412	11.509
597,50	0,2434	0,7566	556,3706	0,0010758	16.859
962,55	0,0856	0,9144	460,3565	0,0012104	21.068
786,40	0,1432	0,8568	491,9148	0,0011419	19.153
191,05	0,6866	0,3134	1343,1716	0,0011036	11.914

Berdasarkan Tabel 4.36, nilai minimum $D(tp)$ sebesar 0,0010402 atau 0,1% untuk komponen *screw* terjadi pada $tp = 382,25$ jam atau sekitar 15,92 hari dengan mesin beroperasi 24 jam/hari. Pada waktu ini, nilai $C(tp)$ tercatat sebesar Rp 14.152/jam. Hal ini menunjukkan bahwa penggantian *screw* setiap 382,25 jam atau 15,92 hari mampu meminimalkan *downtime* dan sekaligus mengoptimalkan biaya perawatan rata-rata per jam operasi mesin. Oleh karena itu, $tp = 382,25$ jam atau 15,92 hari ditetapkan sebagai interval penggantian pencegahan yang paling efisien, baik dari segi teknis maupun finansial.

4. *Hopper*

Berdasarkan hasil perhitungan *reliability* dan interval penggantian optimal komponen *hopper* yang berdistribusi normal, serta setelah diketahui nilai C_p dan C_f yang tertera pada Tabel 4.33, dilakukan perhitungan interval biaya penggantian komponen. Perhitungan ini mengacu pada Rumus 2.34 dan digunakan untuk menentukan nilai $C(tp)$, yaitu biaya rata-rata per satuan waktu yang mencerminkan efisiensi biaya dari tindakan penggantian pencegahan. Berikut merupakan contoh perhitungan untuk $tp = 765,40$ jam berdasarkan TTF *hopper* pada Tabel 4.16.

$$\begin{aligned}
 C(tp) &= \frac{C_p R(tp) + C_f (1 - R(tp))}{(tp + T_p) R(tp) + (M(tp) + T_f)(1 - R(tp))} \\
 &= \frac{Rp\ 4.150.650 \cdot 0,1230 + Rp\ 9.020.304 \cdot 0,8770}{94,2168\ jam + 569,427\ jam \cdot 0,8770} \\
 &= \frac{Rp\ 510.529,95 + Rp\ 7.910.806,608}{593,6042\ jam} \\
 &= Rp\ 14.186/jam
 \end{aligned}$$

Nilai $C(tp)$ dihitung setelah mendapatkan $R(tp)$, $F(tp)$, dan $M(tp)$ untuk komponen *hopper*. Nilai $C(tp)$ ini menentukan biaya penggantian pencegahan yang paling efektif.

Adapun rekapitulasi nilai interval biaya penggantian komponen mesin *hopper* dapat dilihat pada Tabel 4.37 berikut.

Tabel 4. 37 Interval Biaya Penggantian Komponen *Hopper*

tp (jam)	F (tp)	R (tp)	M (tp) (jam)	D (tp)	C (tp) (Rp)
765,40	0,8770	0,1230	568,8370	0,0009940	14.186
722,15	0,8340	0,1660	598,1654	0,0009526	13.259
292,10	0,1841	0,8159	2709,7772	0,0007996	6.840
303,40	0,1977	0,8023	2523,3687	0,0007942	6.883
411,30	0,3520	0,6480	1417,2443	0,0007706	7.660

Berdasarkan Tabel 4.37, nilai minimum $D(tp)$ sebesar 0,0007706 atau 0,07% untuk komponen *hopper* terjadi pada $tp = 411,30$ jam atau sekitar 17,13 hari dengan mesin beroperasi 24 jam/hari. Pada waktu ini, nilai $C(tp)$ tercatat sebesar Rp 7.660/jam. Hal ini menunjukkan bahwa penggantian *screw* setiap 411,30 jam atau 17,13 hari mampu meminimalkan *downtime* dan sekaligus mengoptimalkan biaya perawatan rata-rata per jam operasi mesin. Oleh karena

itu, $t_p = 411,30$ jam atau 17,13 hari ditetapkan sebagai interval penggantian pencegahan yang paling efisien, baik dari segi teknis maupun finansial.

4.1.13 Perbandingan Biaya *Maintenance*

Setelah dilakukan perhitungan interval penggantian optimal menggunakan metode *age replacement*, yaitu saat total biaya perawatan pencegahan $C(t_p)$ mencapai nilai minimum, selanjutnya dilakukan perbandingan biaya perawatan sebelum dan sesudah metode ini diterapkan. Tujuan dari perbandingan ini adalah untuk menilai efektivitas metode *age replacement* dalam menekan total biaya perawatan komponen.

1. Total Biaya Perawatan Sebelum *Age Replacement*

Biaya ini merupakan total biaya perawatan yang dikeluarkan perusahaan saat ini, yaitu sebelum diterapkannya strategi penggantian terencana, selama periode Juli hingga Desember 2024. Total biaya perawatan untuk setiap komponen dihitung berdasarkan nilai *Cost of Failure* (C_f) yang sebelumnya telah dikalikan dengan frekuensi kerusakan pada periode tersebut. Dengan demikian, *Cost of Failure* (C_f) dalam konteks ini merepresentasikan total biaya perawatan sebelum penerapan metode *Age Replacement*. Rincian perhitungan untuk masing-masing komponen disajikan pada Tabel 4.38.

Tabel 4. 38 Total Biaya Perawatan Sebelum *Age Replacement*

Nama Komponen	Total Kerusakan	Total Biaya Perawatan (Rp)
<i>Nozzle</i>	9 kali	14.906.425
<i>Clamping Unit</i>	8 kali	8.726.232
<i>Screw</i>	8 kali	11.192.000
<i>Hopper</i>	6 kali	9.020.304

2. Total Biaya Perawatan Sesudah *Age Replacement*

Perhitungan biaya perawatan usulan mencakup biaya penggantian terencana (*preventive replacement*) berdasarkan interval optimal yang telah ditentukan. Sebagai contoh, komponen *nozzle* memiliki interval optimal penggantian sebesar 277,55 jam atau 11,56 hari, dengan operasi mesin 24 jam per hari. Biaya penggantian preventif per siklus adalah Rp 13.611. Dengan total hari operasi selama 6 bulan sebesar 144 hari, maka jumlah siklus penggantian adalah:

$$\begin{aligned}
 - \text{Jumlah penggantian} &= \frac{144 \text{ hari}}{11,56 \text{ hari}} \\
 &= 12,45 = 12 \text{ siklus penggantian}
 \end{aligned}$$

Maka, Total biaya penggantian nozzle selama periode tersebut adalah

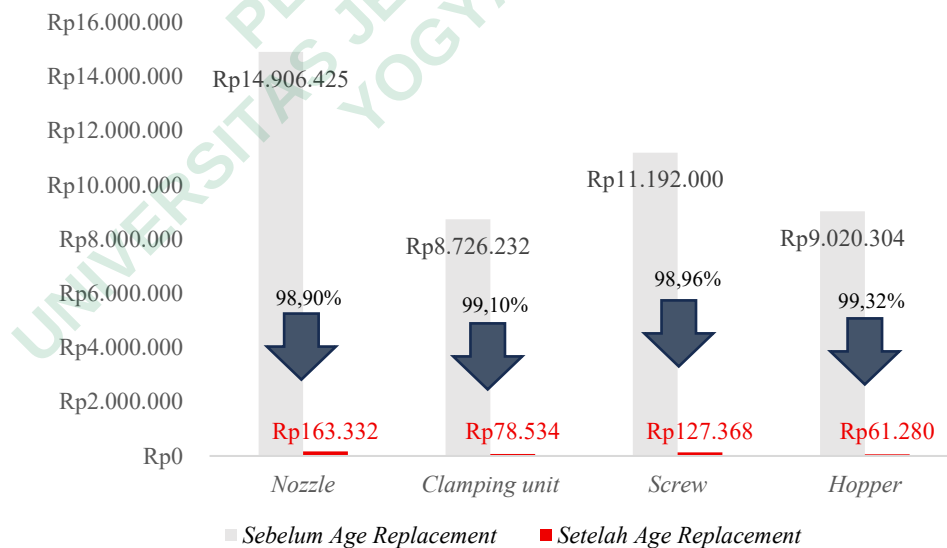
$$\begin{aligned}
 - \text{Total Cost} &= \text{Rp } 13.611 \times 12 \text{ siklus penggantian} \\
 &= \text{Rp } 163.332
 \end{aligned}$$

Pada Tabel 4.39 berikut merupakan hasil perhitungan untuk seluruh komponen kritis mesin.

Tabel 4. 39 Total Biaya Perawatan Sesudah *Age Replacement*

Nama Komponen	Jumlah hari mesin beroperasi (hari)	Interval waktu penggantian Komponen (hari)	Interval biaya penggantian Komponen (Rp)	Total Cost (Rp)
Nozzle	144	11,56	13.611	163.332
Clamping Unit	144	16,83	8.726	78.534
Screw	144	15,92	14.152	127.368
Hopper	144	17,13	7.660	61.280

Setelah dilakukan perhitungan, berikut merupakan hasil perbandingan yang ditampilkan pada Gambar 4.4, mencakup biaya perawatan untuk setiap komponen kritis sebelum dan sesudah dihitung dengan *age replacement*.



Gambar 4. 4 Grafik Perbandingan Total Biaya Maintenance

Berdasarkan Gambar 4.4, penerapan strategi *preventive maintenance* dengan metode *age Replacement* menghasilkan penghematan biaya yang tinggi dibandingkan *corrective maintenance*. Strategi ini mencegah terjadinya *downtime* dan kerugian akibat kerusakan mendadak karena penggantian dilakukan sebelum komponen gagal. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa biaya perawatan menurun drastis untuk *nozzle* sebesar 98,90%, *clamping unit* 99,10%, *screw* 98,86%, dan *hopper* 99,32%. Rata-rata penurunan biaya mencapai 99,05%, menunjukkan bahwa pendekatan ini sangat efektif dalam mengurangi beban pemeliharaan tanpa mengganggu jalannya produksi.

4.2 Analisis dan Pembahasan

4.2.1 Overall Equipment Effectiveness

Analisis perhitungan *Overall Equipment Effectiveness* (OEE) mesin injeksi Haitian MA8000 selama periode Juli hingga Desember 2024 menunjukkan nilai rata-rata sebesar 59,21%, yang tergolong rendah jika dibandingkan dengan standar ideal sebesar 85%. Berdasarkan standar *Japan Institute of Plant Maintenance* (JIPM), nilai ini masuk dalam kategori rendah, yang menandakan efektivitas mesin belum optimal. Secara komponen, *availability* mencapai 94,83% dan *quality* sebesar 97,94%, menunjukkan bahwa waktu operasi mesin tinggi dan kualitas produk baik.

Namun, nilai *performance* hanya mencapai 63,84%, jauh di bawah standar 95%, dan menjadi faktor utama rendahnya OEE. Rendahnya performa ini mengindikasikan bahwa proses produksi belum berjalan pada kecepatan ideal, yang kemungkinan disebabkan oleh tingginya waktu *downtime*, lamanya proses *setup*, serta waktu siklus aktual yang lebih lama dari standar. Oleh karena itu, fokus perbaikan sebaiknya diarahkan pada peningkatan aspek *performance* guna mengoptimalkan efektivitas mesin secara keseluruhan.

4.2.2 Total Effective Equipment Performance

Analisis perhitungan *Total Effective Equipment Performance* (TEEP) mesin injeksi Haitian MA8000 selama periode Juli hingga Desember 2024 menunjukkan nilai rata-rata sebesar 34,54%. Angka ini menunjukkan bahwa mesin hanya

dimanfaatkan sekitar sepertiga dari total waktu kalender yang tersedia untuk produksi. Dengan kata lain, potensi penggunaan mesin dalam 24 jam sehari dan 7 hari seminggu belum dimaksimalkan secara optimal. Nilai *utilization* mesin selama periode tersebut tercatat sebesar 58,80%, yang mengindikasikan bahwa mesin belum sepenuhnya digunakan sesuai kapasitas waktu kalender yang tersedia. Jika dibandingkan dengan standar global TEEP menurut Joseph dan Jayamohan sebesar 80%, terdapat selisih sebesar 45,46%, yang menunjukkan bahwa efektivitas pemanfaatan waktu kerja secara menyeluruh masih tergolong rendah.

Faktor utama yang berkontribusi terhadap rendahnya TEEP adalah nilai *performance* yang juga rendah dalam perhitungan OEE. Selain disebabkan oleh faktor teknis seperti waktu *idle*, lamanya *setup*, dan perbedaan antara waktu siklus aktual dan waktu ideal, rendahnya TEEP juga dipengaruhi oleh faktor eksternal seperti fluktuasi permintaan. Ketika volume pesanan rendah, mesin tidak beroperasi pada kapasitas penuh, sehingga mengurangi efektivitas secara keseluruhan.

4.2.3 Reliability Centered Maintenance

1. Functional Block Diagram

Hasil pemetaan melalui *Functional Block Diagram* (FBD) menunjukkan bahwa komponen utama pada mesin Haitian MA8000 bekerja secara terintegrasi dalam satu alur produksi, mulai dari pemasukan material hingga proses pencetakan produk jadi. Diagram ini menggambarkan hubungan fungsional antar komponen seperti *hopper*, *barrel*, *heater*, *screw*, *nozzle*, *molding unit*, *control panel*, *hydraulic unit*, dan *clamping unit*. Analisis ini mengungkap bahwa gangguan pada satu komponen saja, seperti *heater* atau *hydraulic unit* berpotensi menghentikan keseluruhan proses produksi. Dengan demikian, FBD tidak hanya membantu memahami struktur kerja mesin, tetapi juga berperan penting dalam mengidentifikasi titik-titik kritis kegagalan fungsi yang menjadi dasar utama dalam analisis *Reliability Centered Maintenance* (RCM) selanjutnya.

2. Failure Mode and Effect Analysis

Analisis FMEA terhadap mesin Injeksi Haitian MA8000 menunjukkan bahwa beberapa komponen memiliki tingkat risiko kegagalan yang tinggi berdasarkan

nilai *Risk Priority Number* (RPN). Dengan ambang batas kritis sebesar 106,325, komponen yang tergolong kritis meliputi *Nozzle* dengan nilai 212,5, *Clamping Unit* dengan nilai 131,6, *Hopper* dengan nilai 127,2, dan *Screw* dengan nilai 119,4. Penilaian dilakukan berdasarkan tingkat *severity* (keparahan dampak), *occurrence* (frekuensi kegagalan), serta *detection* (kemampuan deteksi), dengan masukan dari operator, kepala regu/produksi dan bagian *maintenance*. Hasil ini menunjukkan bahwa keempat komponen tersebut harus menjadi prioritas dalam strategi pemeliharaan, guna meminimalkan risiko kerusakan yang dapat mengganggu jalannya produksi secara keseluruhan.

3. *Plotting* Distribusi Kerusakan Komponen

Plotting distribusi kerusakan dilakukan pada komponen-komponen kritis mesin berdasarkan data *Time to Failure* (TTF) dan *Time to Repair* (TTR). TTF merepresentasikan interval antar kerusakan, sedangkan TTR menggambarkan durasi waktu perbaikan. Kedua parameter ini menjadi dasar untuk memahami pola kerusakan dan efektivitas perbaikan pada tiap komponen. Uji *Goodness of Fit* dilakukan menggunakan bantuan *software EasyFit 5.5 Professional* dengan metode *Kolmogorov-Smirnov* untuk menilai kecocokan data terhadap empat distribusi umum yaitu *Weibull*, Normal, Lognormal, dan Eksponensial. Metode ini dipilih karena mampu memberikan hasil objektif meskipun jumlah data terbatas. Hasil uji menunjukkan distribusi paling sesuai untuk masing-masing komponen, yang kemudian digunakan dalam analisis keandalan dan penentuan strategi pemeliharaan.

4. Perhitungan TTR, TTF, MTTR dan MTTF

Hasil analisis menunjukkan bahwa distribusi *Time to Repair* (TTR) dan *Time to Failure* (TTF) pada komponen-komponen kritis bervariasi sesuai karakteristik masing-masing. *Nozzle* memiliki pola TTR dan TTF yang mengikuti distribusi *Weibull* mengindikasikan tingkat kerusakan dan perbaikan yang berubah seiring waktu. *Clamping Unit* menunjukkan distribusi Normal baik untuk TTR maupun TTF, menandakan kestabilan waktu kerusakan dan perbaikan di sekitar rata-rata. Adapun *Screw* dan *Hopper* mengikuti distribusi

Lognormal untuk TTR, sedangkan TTF-nya masing-masing mengikuti distribusi *Weibull* dan Normal. Selanjutnya, perhitungan *Mean Time to Repair* (MTTR) dan *Mean Time to Failure* (MTTF) digunakan untuk mengukur efisiensi perbaikan dan keandalan operasional. *Clamping Unit* memiliki MTTR tercepat yaitu 0,5 jam atau 30 menit, sementara *Nozzle* paling lambat dengan 0,85 jam atau 51 menit. Dari sisi keandalan, *Hopper* menunjukkan kinerja terbaik dengan MTTF sebesar 498,87 jam, diikuti oleh *Clamping Unit* dan *Screw*. *Nozzle* mencatat MTTF terendah sebesar 372,08 jam, menunjukkan bahwa komponen ini lebih sering mengalami kerusakan. Hasil ini memberikan gambaran menyeluruh tentang tingkat keandalan dan efektivitas perbaikan, serta menjadi dasar pengambilan keputusan dalam strategi pemeliharaan mesin secara lebih terarah.

4.2.4 Perhitungan *Reliability* dan Interval Waktu Penggantian Optimal

Hasil analisis *reliability* dan interval waktu penggantian optimal berdasarkan model *age replacement* menunjukkan bahwa setiap komponen kritis pada mesin memiliki waktu penggantian preventif yang berbeda sesuai dengan karakteristik kegagalannya. Nilai $D(tp)$ yang merepresentasikan probabilitas total *downtime* per unit waktu menjadi indikator utama dalam menentukan interval penggantian yang paling efektif untuk meminimalkan risiko kerusakan serta mengurangi *downtime* produksi.

Dari data yang diperoleh, komponen *Nozzle* memiliki interval penggantian paling pendek yaitu 277,55 jam atau 11,56 hari yang mengindikasikan tingkat keandalan terendah sehingga memerlukan penggantian lebih sering agar menghindari gangguan produksi. Komponen *Clamping Unit* dan *Screw* masing-masing memiliki interval penggantian 404 jam atau 16,83 hari dengan penggantian dan 382,25 jam atau 15,92 hari yang menunjukkan keandalan lebih baik namun tetap memerlukan pemantauan agar kualitas proses tetap optimal. Sedangkan *Hopper* memiliki interval penggantian terpanjang yaitu 411,30 jam atau 17,13 hari, menandakan keandalan relatif tinggi meskipun penggantian tepat waktu tetap penting untuk mencegah penumpukan material dan kerusakan fisik. Analisis ini

menjadi dasar penetapan jadwal pemeliharaan preventif yang dapat meningkatkan keandalan mesin sekaligus mengoptimalkan efisiensi operasional.

4.2.5 Analisis Biaya

Analisis biaya dilakukan untuk mengidentifikasi total pengeluaran yang timbul dari aktivitas pemeliharaan, baik dalam kondisi terjadinya kerusakan maupun melalui tindakan pencegahan. Perhitungan mencakup beberapa elemen penting, seperti biaya pembelian komponen, upah teknisi, tenaga operator yang tidak produktif selama proses perbaikan, serta kerugian akibat kehilangan *output* produksi. Empat komponen kritis yang dianalisis yaitu *nozzle*, *clamping unit*, *screw*, dan *hopper* yang dihitung berdasarkan frekuensi kerusakan, harga satuan komponen, serta nilai *Mean Time to Repair* (MTTR) masing-masing. Analisis ini menjadi dasar dalam menentukan strategi pemeliharaan yang paling ekonomis dan efektif untuk diterapkan.

Hasil rekapitulasi menunjukkan bahwa biaya akibat kerusakan (*cost of failure*) secara konsisten lebih tinggi dibandingkan biaya penggantian preventif (*cost of preventive*) untuk seluruh komponen. Pada komponen *nozzle*, biaya kerusakan tercatat sebesar Rp14.906.425, sementara biaya pencegahannya hanya Rp4.408.824. *Clamping unit* memiliki biaya kerusakan Rp8.726.232 dan biaya pencegahan Rp3.242.784. Komponen *screw* menunjukkan selisih yang besar, dengan biaya kerusakan sebesar Rp11.192.000 dan biaya pencegahan Rp4.482.592. Sedangkan *hopper* mencatat biaya kerusakan Rp9.020.304, jauh lebih tinggi dibandingkan biaya pencegahannya sebesar Rp4.150.650. Perbandingan ini secara jelas menunjukkan bahwa strategi pemeliharaan preventif lebih ekonomis, mampu mengurangi potensi *downtime*, dan mencegah akumulasi biaya tinggi akibat kerusakan secara tiba-tiba yang tidak terencana.

4.2.6 Perhitungan Interval Biaya Penggantian Komponen

Perhitungan biaya penggantian pencegahan dilakukan menggunakan model *Age Replacement* dengan tujuan untuk menentukan interval waktu penggantian (T_p) yang paling efisien secara biaya. Biaya rata-rata per satuan waktu $C(t_p)$ dihitung dengan mempertimbangkan *cost of preventive* (C_p), *cost of failure* (C_f),

serta fungsi keandalan $R(tp)$. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa masing-masing komponen memiliki interval optimal yang berbeda

- *Nozzle* memiliki tp optimal sebesar 277,55 jam, dengan nilai $C(tp)$ minimum sebesar Rp 13.611.
- *Clamping Unit* memiliki tp optimal sebesar 404 jam, dengan nilai $C(tp)$ minimum sebesar Rp 9.136.
- *Screw* memiliki tp optimal sebesar 382,25 jam, dengan nilai $C(tp)$ minimum sebesar Rp 14.152.
- *Hopper* memiliki tp optimal sebesar 411,30 jam, dengan nilai $C(tp)$ minimum sebesar Rp 7.660.

Nilai-nilai tersebut menunjukkan bahwa penggantian pencegahan secara terjadwal mampu mengurangi potensi kerusakan secara tiba-tiba, menekan biaya perawatan, serta meminimalkan *downtime* mesin. Dengan kata lain, strategi penggantian pencegahan berdasarkan pendekatan *Age Replacement* terbukti efektif baik secara teknis maupun finansial.

4.2.7 Perbandingan Biaya *Maintenance*

Setelah dilakukan perhitungan interval optimal penggantian komponen dengan metode *Age Replacement*, dilakukan analisis perbandingan antara total biaya perawatan sebelum dan sesudah metode diterapkan. Biaya sebelum menggunakan metode dihitung berdasarkan *cost of failure* yang telah dikalikan dengan frekuensi kerusakan aktual dari Juli hingga Desember 2024. Sementara itu, biaya setelahnya diperoleh dari jumlah siklus penggantian preventif yang dihitung berdasarkan interval optimal dikalikan dengan biaya penggantian terjadwal. Hasil perbandingan menunjukkan penurunan biaya yang tinggi pada seluruh komponen. Biaya perawatan *nozzle* menurun dari Rp 14.906.425 menjadi Rp 163.332 atau sebesar 98,90%, *clamping unit* dari Rp 8.726.232 menjadi Rp 78.534 atau sebesar 99,10%, *screw* dari Rp 11.192.000 menjadi Rp 127.368 atau sebesar 98,86%, dan *hopper* dari Rp 9.020.304 menjadi Rp 61.280 atau sebesar 99,32%. Rata-rata penurunan biaya pemeliharaan mencapai 99,05%.

Penurunan ini terjadi karena penggantian komponen dilakukan secara terjadwal sebelum kerusakan terjadi, sehingga dapat mencegah konsekuensi dari kegagalan mendadak seperti *downtime* mesin, hilangnya *output* produksi, serta waktu kerja teknisi dan operator yang tidak produktif. Dengan strategi ini, perusahaan tidak hanya menekan biaya langsung perawatan, tetapi juga menghindari kerugian tidak langsung akibat gangguan operasional. Oleh karena itu, penerapan metode *age replacement* dinilai efektif dalam menurunkan biaya pemeliharaan, menjaga kontinuitas produksi, dan meningkatkan keandalan sistem secara keseluruhan.

PERPUSTAKAAN
UNIVERSITAS JENDERAL ACHMAD YANU
YOGYAKARTA