

Available online at: <https://journal.lppmunindra.ac.id/index.php/JOTI>

Jurnal Optimasi Teknik Industri

| ISSN (Print) 2656-3789 | ISSN (Online) 2657-0181 |



Usulan Strategi Perawatan *Excavator* Menggunakan Metode RCM, *Age Replacement* dan RCS

Dio Aldri^{1*}, Asep Endih Nurhidayat²

^{1,2} Program Studi Teknik Industri, Universitas Indraprasta PGRI Jakarta

*Corresponding author: aldri192.d@gmail.com

ARTICLE INFORMATION

Received: 29 Juli 2021
 Revised: 06 Agustus 2021
 Accepted: 09 Agustus 2021
 Available online: 28 September 2021

KEYWORDS

Maintenance Strategy
 Reliability Centered Maintenance
 Reliability Centered Spares
 Age Replacement
 MTTF

A B S T R A K

Tujuan dalam penelitian ini ialah penetapan strategi, waktu, kebutuhan suku cadang, biaya serta upaya untuk merumuskan usulan perbaikan dari tiap komponen kritis guna melakukan perawatan unit 320GC belum ditentukan secara spesifik. Dengan metode RCM, *age replacement* dan RCS, data yang telah diolah dan dianalisis menghasilkan simpulan antara lain strategi perawatan yang tepat adalah *schedule discard task*. Waktu yang tepat untuk perawatan dan kebutuhan *parts* per tahun pada HEX-004 adalah *element-fuel* pada 463 jam dan 20 unit, *seal gp-duo cone* pada 882 jam dan 12 unit, serta *valve gp-sol* pada 1025 jam dan 11 unit. Pada HEX-012 *element-fuel* pada 472 jam dan 21 unit, *valve gp-sol* pada 896 jam dan 12 unit, serta *sensor as-level* pada 1136 jam dan 10 unit. Total penghematan dari strategi yang diusulkan sebesar \$ 290,47 atau Rp 4.088.024,21 per jam. Usulan perbaikan pada *seal gp-duo cone* dengan mengecek *oli final drive* dengan *Scheduled Oil Sampling*, *element-fuel* dengan menjaga kebersihan *fuel* yang akan diisikan ke tangki bahan bakar sesuai standar ISO4406:2021, serta *valve gp-sol* dan *sensor as-level* adalah mengecek *active event* pada *memory Electronic Control Module*.

I. INTRODUCTION

Indonesia merupakan salah satu negara pengekspor batubara terbesar di dunia. Di tahun 2019 produksi batubara Indonesia sebesar 610 juta ton atau meningkat 9,52 % dari tahun sebelumnya dan melebihi target produksi 2019 yaitu sebesar 489 juta ton [1]. Batubara menyumbang devisa tertinggi berdasarkan komoditas pada tahun 2019 dengan raihan sebesar 21,7 miliar Dollar Amerika Serikat atau unggul sekitar 17,9% dibanding sektor pariwisata yang menyumbang 18,4 miliar Dollar Amerika Serikat [2]. Potensi besar di sektor pertambangan batubara tersebut memicu peningkatan permintaan alat berat di Indonesia. Di tahun 2019 jumlah kebutuhan alat berat sebesar 129.150 unit untuk semua sektor, sedangkan jumlah ketersediaan alat yang ada berkisar 54.640 unit dan proyeksi di tahun 2020 berkisar 68.631 unit. Hal tersebut menjadikan potensi bisnis di sektor penjualan alat berat ini masih besar [3]. Melihat potensi tersebut PT. XYZ merilis *excavator* 320GC. Produk alat berat *Caterpillar* dipilih karena mempunyai reputasi global yang sangat baik dan mempunyai sebaran pasar terbesar di dunia dengan pangsa pasar sebesar 31% [4].

Salah satu bentuk layanan purna jual yang ditawarkan oleh PT. XYZ ialah solusi perawatan terintegrasi pada

seluruh unit. Pemeliharaan (*maintenance*) didefinisikan sebagai pekerjaan menjaga sesuatu dalam kondisi yang tepat [5]. Tujuan dari fungsi ini adalah untuk melestarikan aset atau kemampuan aset untuk menghasilkan sesuatu dengan aman dan ekonomis. Pemeliharaan juga bisa dikaitkan dengan serangkaian tindakan yang dilakukan pada suatu objek guna mempertahankannya dalam kondisi tertentu atau untuk mengembalikan pada keadaan yang telah ditentukan [6]. Penentuan strategi perawatan dari masing-masing unit pada dasarnya telah terstandarisasi dan dikontrol oleh PT. XYZ, tetapi kurangnya pemahaman mengenai strategi perawatan yang sesuai dengan karakteristik unit, maka seringkali para pelanggan menunggu unitnya sampai *breakdown*. Hal tersebut juga dialami oleh unit 320GC, khususnya di area Kalimantan Timur. Dalam manajemen pemeliharaan (*maintenance management*), strategi mengacu kepada pemilihan metode atau cara taktis guna mengelola aset fisik tertentu. Keputusan untuk menggunakan metode pemeliharaan preventif atau prediktif yang sering disebut sebagai "strategi perawatan" untuk dapat diterapkan pada segala peralatan yang digunakan. Strategi sebaiknya sederhana karena pada kenyataannya, banyak dari strategi yang

sukses hanya sekadar panduan yang tidak rumit ataupun aturan sederhana [7].

Reliability atau keandalan teknik adalah fungsi waktu. Keandalan teknik tergantung pada kondisi yang dinyatakan. Pentingnya keandalan dalam arti rekayasa adalah bahwa itu adalah parameter teknik seperti yang lain, seperti efisiensi, daya atau apapun [8]. Metode *Reliability Centered Maintenance* (RCM) digunakan menentukan jenis komponen kritis pada unit 320GC. Metode RCM juga digunakan dalam penyusunan strategi perawatan yang tepat sesuai tingkat kekritisan komponen berdasarkan data yang telah dikumpulkan. Dalam *reliability* dikenal istilah kurva *bathhtub hazard rate*. Kurva disebut kurva *bathhtub hazard rate* karena menyerupai bentuk bak mandi. Kurva terbagi atas tiga periode yakni periode *burn-in*, masa manfaat, dan periode keausan [9].

Metode *age replacement* digunakan untuk menentukan waktu yang tepat untuk melakukan perawatan berdasarkan data kerusakan tiap komponen. Dalam metode *age replacement* terdapat dua parameter pengukuran utama yaitu MTTF dan MTTR. MTTF adalah metrik kuantitatif yang biasa digunakan untuk menilai keandalan sistem atau produk yang tidak dapat diperbaiki [10]. MTTF ialah hubungan total waktu operasi dari satu set suku cadang yang tak dapat diperbaiki dengan jumlah total kegagalan fungsi yang terdeteksi pada suku cadang di periode yang diamati. MTTR ialah hubungan antara total waktu intervensi korektif dalam sebuah set item dengan kegagalan, dan jumlah total kegagalan terdeteksi pada suku cadang dalam periode yang diamati [11].

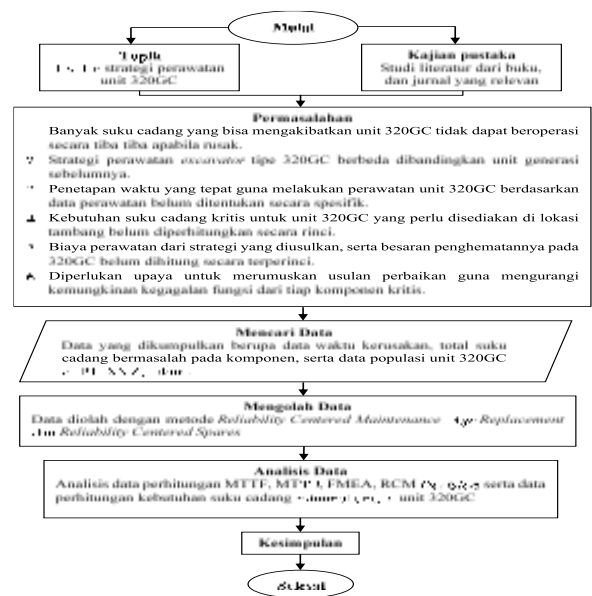
Metode *Reliability Centered Spares* (RCS) digunakan dalam melakukan perhitungan kebutuhan suku cadang untuk unit 320GC yang perlu disediakan untuk mendukung proses pemeliharaan. Suku cadang perlu dievaluasi dalam hal biaya dan kekritisan. Kekritisan juga dapat dianalisis dengan menggunakan kriteria antara lain

1. Sangat kritis: bagian yang mutlak penting untuk pengoperasian peralatan.
2. Cukup kritis: bagian yang jika tidak tersedia akan memiliki sedikit sampai dengan sedang berpengaruh pada pengoperasian peralatan.
3. Kekritisan rendah: bagian yang tidak mutlak penting untuk pengoperasian perlengkapan [12].

II. METHOD

Penelitian dilakukan dengan studi literatur dan wawancara. Studi literatur dilakukan dengan mengkaji sistem *excavator* 320GC dari referensi digital yang diperoleh dari perusahaan. Wawancara dilakukan untuk mendapatkan informasi tambahan terkait produktivitas unit, harga acuan pasar batubara. Penulis mengumpulkan data primer yang berupa data komponen terpasang, harga suku cadang di pasaran dan sistem kerjanya, data waktu dan total kerusakan komponen, daftar suku cadang yang bermasalah pada unit, populasi unit di area penelitian, dan

data terkait profil perusahaan. Data sekunder berupa referensi tambahan seperti tabel fungsi gamma, dan artikel dari penelitian terdahulu. Metode yang digunakan dalam penelitian ini antara lain menggunakan metode *Reliability Centered Maintenance* (RCM), metode *age replacement*, dan metode *Reliability Centered Spares* (RCS). *Flow chart* penelitian ini dapat digambarkan sebagai berikut.



Gambar 1. Flowchart Penelitian

III. RESULTS AND DISCUSSION

1. Data Availability Unit

Dari pengumpulan data diperoleh data *availability* dari tiap unit 320GC yang berada di area pertambangan di Kalimantan Timur sebagai berikut:

Tabel 1. Data Availability Unit 320GC di PT XYZ

Field ID	Avail ability (%)	Target (%)	Field ID	Avail ability (%)	Target (%)
HEX-001	88	85	HEX-012	83	85
HEX-002	89	85	HEX-013	87	85
HEX-003	98	85	HEX-014	96	85
HEX-004	80	85	HEX-015	90	85
HEX-005	93	85	HEX-016	91	85
HEX-006	89	85	HEX-017	89	85
HEX-007	86	85	HEX-018	92	85
HEX-008	92	85	HEX-019	88	85
HEX-009	92	85	HEX-020	96	85
HEX-010	91	85	HEX-021	92	85
HEX-011	98	85			

Dari tabel di atas diketahui bahwa unit HEX-004 dan HEX-012 mempunyai *availability* di bawah target. Oleh karena itu unit yang menjadi fokus dalam penelitian ini adalah HEX-004 dan HEX-012.

2. Data Komponen Kritis

Komponen kritis dari *excavator* dengan kode HEX-004 adalah sebagai berikut.

Tabel 2. Data Komponen Kritis HEX-004

Rank	System	Subsystem	Part Description	Event Reported
1	Fuel System	Filter Gp	Element-Fuel	27
2	Fuel System	Pump Gp-Fuel Injection	Injector Gp-Fuel	4
3	Final Drive	Drive Gp-Final	Seal Gp-Duo Cone	16
4	Control Valve	Valve Gp-Main Control	Valve Gp-Sol	14
5	Lube System	Pan Gp-Oil	Gasket-Sump	9
6	Hydraulic Tank	Tank & Filter Gp-Hydraulic	Sensor Gp-Temp	1
7	Electrical	Wiring Gp	Switch As-Limit	1

Pada HEX-012 diperoleh data komponen kritis sebagai berikut

Tabel 3. Data Komponen Kritis HEX-012

Rank	System	Subsystem	Part Description	Event Reported
1	Fuel System	Filter Gp	Element-Fuel	29
2	Fuel System	Pump Gp-Fuel Priming	Sensor As-Level	12
3	Fuel System	Filter Gp	Sensor Gp-Press	9
4	Fuel System	Pump Gp-Fuel Injection	Injector Gp-Fuel	5
5	Control Valve	Valve Gp-Main Control	Valve Gp-Sol	15
6	Cooling System	Radiator & Hyd Oil Cooler Gp	Fan As-Axial	7
7	Electrical	Wiring Gp	Switch As	2

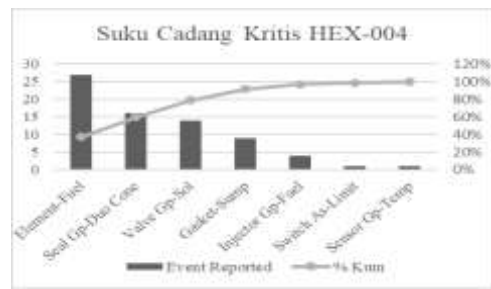
3. Diagram Pareto Data Komponen Kritis

Persentase kumulatif dari kejadian kegagalan fungsi komponen kritis pada *excavator* dengan kode HEX-004 sebagai berikut.

Tabel 4. Data Komponen Kritis HEX-004

Rank	Part Description	Event Reported	%	% Kum
1	Element-Fuel	27	38%	38%
2	Seal Gp-Duo Cone	16	22%	60%
3	Valve Gp-Sol	14	19%	79%
4	Gasket-Sump	9	13%	92%
5	Injector Gp-Fuel	4	6%	97%
6	Switch As-Limit	1	1%	99%
7	Sensor Gp-Temp	1	1%	100%
Total Event Reported		72	100%	

Diagram pareto data komponen kritis HEX-004 adalah sebagai berikut



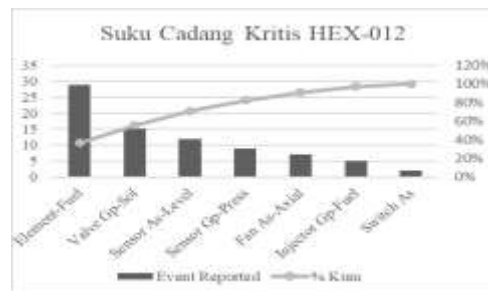
Gambar 2. Suku Cadang Kritis HEX-004

Persentase kumulatif dari kejadian kegagalan fungsi komponen kritis pada *excavator* dengan kode HEX-012 sebagai berikut

Tabel 5. Data Komponen Kritis HEX-012

Rank	Part Description	Event Reported	%	% Kum
1	Element-Fuel	29	37%	37%
2	Valve Gp-Sol	15	19%	56%
3	Sensor As-Level	12	15%	71%
4	Sensor Gp-Press	9	11%	82%
5	Fan As-Axial	7	9%	91%
6	Injector Gp-Fuel	5	6%	97%
7	Switch As	2	3%	100%
Total Event Reported		79	100%	

Diagram pareto data komponen kritis HEX-012 adalah sebagai berikut



Gambar 3. Suku Cadang Kritis HEX-004

Dari diagram pareto diperoleh kesimpulan bahwasanya terdapat 4 komponen kritis pada HEX-004 yaitu *element-fuel*, *seal gp-duo* dan *valve gp-sol*. Sedangkan pada HEX-012 terdapat 4 komponen kritis yaitu *element-fuel*, *valve gp-sol*, dan *sensor as level*.

4. Penentuan Time To Repair dan Time To Failure Komponen Kritis

Time To Repair (TTR) merupakan waktu yang diperlukan untuk memperbaiki komponen. *Time To Failure* (TTF) merupakan interval waktu antar kerusakan yang dihitung dari selisih antara waktu kerusakan komponen yang telah selesai diperbaiki dengan waktu kerusakan komponen berikutnya. Komponen *element-fuel* pada *excavator* dengan kode HEX-004 memiliki nilai TTR dan TTF sebagai berikut.

Tabel 6. Data TTR dan TTF Komponen *Element-Fuel* HEX-004

No	Date	TTR	TTF
1	30 Jan 19	7	
2	25 Feb 19	10	513
3	23 Mar 19	11	516
4	17 Apr 19	13	501
5	13 Mei 19	11	514

6	8 Jun 19	4	531
7	4 Jul 19	10	524
8	31 Jul 19	12	527
9	25 Agu 19	7	516
10	20 Sep 19	16	504
11	16 Okt 19	6	526
12	10 Nov 19	15	510
13	5 Des 19	9	489
14	31 Des 19	7	530
15	26 Jan 20	3	511
16	21 Feb 20	17	519
17	18 Mar 20	18	516
18	13 Apr 20	5	523
19	9 Mei 20	8	526
20	4 Jun 20	7	521
21	1 Jul 20	5	529
22	26 Jul 20	4	512
23	21 Agu 20	9	516
24	16 Sep 20	14	515
25	11 Okt 20	9	499
26	6 Nov 20	13	522
27	2 Des 20	2	528

Komponen *seal gp-duo cone* pada *excavator* dengan kode HEX-004 memiliki nilai TTR dan TTF sebagai berikut.

Tabel 7. Data TTR dan TTF Komponen *Seal Gp-Duo Cone* HEX-004

No	Date	TTR	TTF
1	4 Jan 19	16	
2	21 Feb 19	16	960
3	10 Apr 19	16	947
4	28 Mei 19	12	962
5	15 Jul 19	16	963
6	31 Agu 19	10	950
7	17 Okt 19	15	929
8	4 Des 19	17	967
9	22 Jan 20	17	977
10	11 Mar 20	17	975
11	29 Apr 20	17	979
12	15 Jun 20	15	949
13	3 Agu 20	11	968
14	21 Sep 20	14	984
15	9 Nov 20	13	977
16	28 Des 20	14	978

Komponen *valve gp-sol* pada *excavator* dengan kode HEX-004 memiliki nilai TTR dan TTF sebagai berikut.

Tabel 8. Data TTR dan TTF Komponen *Valve Gp-Sol* HEX-004

No	Date	TTR	TTF
1	12 Jan 19	16	
2	8 Mar 19	19	1105
3	2 Mei 19	16	1102
4	27 Jun 19	20	1115
5	20 Agu 19	15	1067
6	15 Okt 19	17	1120
7	9 Des 19	18	1106
8	2 Feb 20	18	1108
9	29 Mar 20	18	1110
10	23 Mei 20	15	1114
11	16 Jul 20	19	1080
12	10 Sep 20	13	1119
13	4 Nov 20	17	1099
14	30 Des 20	19	1104

Komponen *element-fuel* pada *excavator* dengan kode HEX-012 memiliki nilai TTR dan TTF sebagai berikut

Tabel 9. Data TTR dan TTF Komponen *Element-Fuel* HEX-012

No	Date	TTR	TTF
1	8 Jan 19	12	
2	2 Feb 19	13	508
3	28 Feb 19	13	514
4	24 Mar 19	6	492
5	19 Apr 19	11	517
6	15 Mei 19	10	515
7	9 Jun 19	9	503
8	5 Jul 19	12	512
9	30 Jul 19	11	508
10	25 Agu 19	12	513
11	19 Sep 19	10	508
12	14 Okt 19	12	506
13	9 Nov 19	10	508
14	4 Des 19	12	505
15	29 Des 19	12	510
16	24 Jan 20	14	515
17	18 Feb 20	10	494
18	14 Mar 20	12	508
19	9 Apr 20	9	512
20	4 Mei 20	12	504
21	30 Mei 20	11	517
22	25 Jun 20	13	511
23	20 Jul 20	13	503
24	14 Agu 20	11	510
25	9 Sep 20	9	514
26	5 Okt 20	10	517
27	30 Okt 20	12	514
28	25 Nov 20	12	510
29	21 Des 20	14	518

Komponen *valve gp-sol* pada *excavator* dengan kode HEX-012 memiliki nilai TTR dan TTF sebagai berikut

Tabel 10. Data TTR dan TTF Komponen *Valve Gp-Sol* HEX-012

No	Date	TTR	TTF
1	3 Jan 19	19	
2	20 Feb 19	20	967
3	9 Apr 19	15	954
4	27 Mei 19	17	959
5	15 Jul 19	10	971
6	31 Agu 19	15	947
7	18 Okt 19	18	963
8	5 Des 19	12	956
9	20 Jan 20	14	930
10	9 Mar 20	19	970
11	26 Apr 20	16	960
12	14 Jun 20	13	978
13	1 Agu 20	18	969
14	19 Sep 20	17	982
15	7 Nov 20	19	962

Komponen *sensor as-level* pada *excavator* dengan kode HEX-012 memiliki nilai TTR dan TTF sebagai berikut

Tabel 11. Data TTR dan TTF *Sensor As-Level* HEX-012

No	Date	TTR	TTF
1	18 Jan 19	10	
2	22 Mar 19	12	1249
3	23 Mei 19	9	1248

4	22 Jul 19	14	1203
5	24 Sep 19	12	1271
6	25 Nov 19	12	1247
7	27 Jan 20	14	1257
8	29 Mar 20	12	1241
9	30 Mei 20	9	1252
10	1 Agu 20	13	1260
11	4 Okt 20	12	1261
12	5 Des 20	15	1244

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

Sebelum menghitung MTTF dan MTTR, maka terlebih dahulu melakukan pengujian distribusi terhadap waktu *failure* (TTF) dan waktu *repair* (TTR) masing-masing komponen kritis. Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan software *Minitab* 19 dengan parameter uji nilai *Anderson Darling Test* (AD) dan *P value*. TTF maupun TTR disebut mengikuti distribusi tertentu bilamana nilai *Anderson Darling*-nya adalah terkecil di antara yang lain dan *P value* > α . Pada pengujian ini nilai $\alpha = 0,05$ atau 5%. Berikut tabel pengujian distribusi dari waktu *repair* (TTR) dari *excavator* dengan kode HEX-004.

Tabel 12. Pengujian Distribusi Terhadap Waktu *Repair* (TTR) HEX-004

Komponen	Distribusi	Nilai <i>Anderson Darling</i>	<i>P-Value</i>	Distribusi Terpilih
<i>Element-Fuel</i>	Normal	0,234	0,773	<i>Weibull</i>
	<i>Exponential</i>	3,371	<0,003	
	<i>Weibull</i>	0,153	>0,250	
	<i>Lognormal</i>	0,388	0,362	
<i>Seal Gp-Duo Cone</i>	Normal	0,712	0,05	<i>Weibull</i>
	<i>Exponential</i>	5,419	<0,003	
	<i>Weibull</i>	0,654	0,08	
	<i>Lognormal</i>	0,872	0,019	
<i>Valve Gp-Sol</i>	Normal	0,324	0,484	<i>Weibull</i>
	<i>Exponential</i>	5,124	<0,003	
	<i>Weibull</i>	0,281	>0,250	
	<i>Lognormal</i>	0,397	0,32	

Berikut tabel pengujian distribusi dari waktu *repair* (TTR) dari *excavator* dengan kode HEX-012.

Tabel 13. Pengujian Distribusi Terhadap Waktu *Repair* (TTR) HEX-012

Komponen	Distribusi	Nilai <i>Anderson Darling</i>	<i>P-Value</i>	Distribusi Terpilih
<i>Element-Fuel</i>	Normal	0,883	0,021	<i>Weibull</i>
	<i>Exponential</i>	9,815	<0,003	
	<i>Weibull</i>	0,723	0,053	
	<i>Lognormal</i>	1,252	<0,005	
<i>Valve Gp-Sol</i>	Normal	0,346	0,433	<i>Weibull</i>
	<i>Exponential</i>	4,707	<0,003	
	<i>Weibull</i>	0,313	>0,250	
	<i>Lognormal</i>	0,495	0,182	
<i>Sensor As-Level</i>	Normal	0,518	0,149	<i>Weibull</i>
	<i>Exponential</i>	4,029	<0,003	

<i>Weibull</i>	0,492	0,208
<i>Lognormal</i>	0,616	0,083

Kemudian ditentukan parameter masing-masing distribusi dengan menggunakan *software Availability Workbench 4* dengan hasil parameter berupa parameter η , dan β . Berikut hasil perhitungan parameter dari distribusi terpilih dan nilai MTTR dari *excavator* dengan kode HEX-004.

Tabel 14. Parameter Distribusi Terpilih dan MTTR HEX-004

Komponen	Distribusi	Parameter		MTTR
		Simbol	Nilai	
<i>Element-Fuel</i>	<i>Weibull</i>	η	10,61	9,39622
		β	2,165	
<i>Seal Gp-Duo Cone</i>	<i>Weibull</i>	η	15,77	14,714
		β	6,845	
<i>Valve Gp-Sol</i>	<i>Weibull</i>	η	18,02	17,0721
		β	9,505	

Berikut hasil perhitungan parameter dari distribusi terpilih dan nilai MTTR dari *excavator* dengan kode HEX-012.

Tabel 15. Parameter Distribusi Terpilih dan MTTR HEX-012

Komponen	Distribusi	Parameter		MTTR
		Simbol	Nilai	
<i>Element-Fuel</i>	<i>Weibull</i>	η	12,09	11,2805
		β	6,632	
<i>Valve Gp-Sol</i>	<i>Weibull</i>	η	17,4	16,1246
		β	5,772	
<i>Sensor As-Level</i>	<i>Weibull</i>	η	12,85	11,9896
		β	6,55	

Berikut tabel pengujian distribusi dari waktu kerusakan (TTF) dari *excavator* dengan kode HEX-004.

Tabel 16. Pengujian Distribusi Terhadap Waktu *Failure* (TTF) HEX-004

Komponen	Distribusi	Nilai <i>Anderson Darling</i>	<i>P-Value</i>	Distribusi Terpilih
<i>Element-Fuel</i>	Normal	0,467	0,232	<i>Weibull</i>
	<i>Exponential</i>	11,483	<0,003	
	<i>Weibull</i>	0,269	>0,250	
	<i>Lognormal</i>	0,498	0,192	
<i>Seal Gp-Duo Cone</i>	Normal	0,44	0,253	<i>Weibull</i>
	<i>Exponential</i>	6,682	<0,003	
	<i>Weibull</i>	0,33	>0,250	
	<i>Lognormal</i>	0,452	0,235	
<i>Valve Gp-Sol</i>	Normal	0,79	0,029	<i>Weibull</i>
	<i>Exponential</i>	5,825	<0,003	
	<i>Weibull</i>	0,333	>0,250	
	<i>Lognormal</i>	0,813	0,026	

Berikut tabel pengujian distribusi dari waktu kerusakan (TTF) dari *excavator* dengan kode HEX-004.

Tabel 17. Pengujian Distribusi Terhadap Waktu *Failure* (TTF) HEX-012

Komponen	Distribusi	Nilai Anderson Darling	P-Value	Distribusi Terpilih
Element-Fuel	Normal	0,686	0,065	Weibull
	Exponential	12,552	<0,003	
	Weibull	0,277	>0,250	
	Lognormal	0,718	0,054	
Valve Gp-Sol	Normal	0,294	0,548	Weibull
	Exponential	6,265	<0,003	
	Weibull	0,181	>0,250	
	Lognormal	0,309	0,516	
Sensor As-Level	Normal	0,76	0,033	Weibull
	Exponential	4,933	<0,003	
	Weibull	0,351	>0,250	
	Lognormal	0,786	0,028	

Hasil perhitungan parameter dari distribusi terpilih dan nilai MTTF dari *excavator* dengan kode HEX-004 adalah sebagai berikut

Tabel 18. Parameter Distribusi Terpilih dan MTTF HEX-004

Komponen	Distribusi	Parameter		MTTF
		Simbol	Nilai	
Element-Fuel	Weibull	η	521,7	515,88
		β	58,2	
Seal Gp-Duo Cone	Weibull	η	971,5	965,99
		β	71,3	
Valve Gp-Sol	Weibull	η	1111	1104,70
		β	79,35	

Hasil perhitungan parameter dari distribusi terpilih dan nilai MTTF dari *excavator* dengan kode HEX-012 adalah sebagai berikut

Tabel 19. Parameter Distribusi Terpilih dan MTTF HEX-012

Komponen	Distribusi	Parameter		MTTF
		Simbol	Nilai	
Element-Fuel	Weibull	η	512,5	509,59
		β	93,22	
Valve Gp-Sol	Weibull	η	968,2	962,71
		β	82,28	
Sensor As-Level	Weibull	η	1257	1249,87
		β	74,13	

6. Perhitungan Age Replacement

a. Perhitungan Age Replacement Element-Fuel pada HEX-004

Dengan nilai α sebesar 521,7, β sebesar 58,2, MTTF sebesar 515,88, MTTR sama dengan Tf yaitu sebesar 9,40, dan Tp sebesar 1, maka nilai masing-masing R(tp), F(tp), M(tp) dan D(tp) antara lain.

Tabel 20. Age Replacement Element-Fuel pada HEX-004

tp	R(tp)	F(tp)	M(tp)	D(tp)
450	0,999817	0,000183	2815223,514	0,001035933
460	0,999342	0,000658	783571,420	0,001029642
461	0,999253	0,000747	690573,322	0,001029393
462	0,999153	0,000847	608782,957	0,001029252
463	0,999039	0,000961	536829,617	0,00102923

464	0,998911	0,001089	473512,670	0,001029344
465	0,998765	0,001235	417780,153	0,001029609
500	0,919096	0,080904	6376,435	0,001718946
520	0,437362	0,562638	916,896	0,007644715

b. Perhitungan Age Replacement Seal Gp-Duo Cone pada HEX-004

Dengan nilai α sebesar 971,5, β sebesar 71,3, MTTF sebesar 965,99, MTTR sama dengan Tf yaitu sebesar 14,71, dan Tp sebesar 2, maka nilai masing-masing R(tp), F(tp), M(tp) dan D(tp) antara lain.

Tabel 21. Age Replacement Seal Gp-Duo Cone HEX-004

tp	R(tp)	F(tp)	M(tp)	D(tp)
850	0,99993	7,293E-05	13246192,29	0,001100663
880	0,99914	8,645E-04	1117423,72	0,001088644
881	0,99906	9,374E-04	1030542,67	0,001088594
882	0,99898	1,016E-03	950506,91	0,001088589
883	0,99890	1,102E-03	876770,26	0,001088632
884	0,99881	1,194E-03	808830,64	0,001088728
885	0,99871	1,294E-03	746226,50	0,001088879
900	0,99572	4,284E-03	225468,41	0,001102064
950	0,81646	1,835E-01	5263,09	0,002481616

c. Perhitungan Age Replacement Valve Gp-Sol pada HEX-004

Dengan nilai α sebesar 1111, β sebesar 79,35, MTTF sebesar 1104,70, MTTR sama dengan Tf yaitu sebesar 17,07, dan Tp sebesar 4, maka nilai masing-masing R(tp), F(tp), M(tp) dan D(tp) antara lain.

Tabel 22. Age Replacement Valve Gp-Sol pada HEX-004

tp	R(tp)	F(tp)	M(tp)	D(tp)
1000	0,99976	0,00024	4684962,71	0,001898574
1024	0,99845	0,00155	713985,78	0,001886422
1025	0,99833	0,00167	660814,37	0,001886414
1026	0,99819	0,00181	611651,91	0,001886474
1027	0,99805	0,00195	566192,68	0,00188661
1028	0,99789	0,00211	524154,53	0,001886826
1050	0,98874	0,01126	98116,15	0,001931583
1100	0,63505	0,36495	3027,02	0,004839791
1200	0,00000	1,00000	1104,70	0,015217023

d. Perhitungan Age Replacement Element-Fuel pada HEX-012

Dengan nilai α sebesar 512,5, β sebesar 93,22, MTTF sebesar 509,59, MTTR sama dengan Tf yaitu sebesar 11,28, dan Tp sebesar 1, maka nilai masing-masing R(tp), F(tp), M(tp) dan D(tp) antara lain

Tabel 23. Age Replacement Element-Fuel pada HEX-012

tp	R(tp)	F(tp)	M(tp)	D(tp)
450	0,99999	5,430E-06	93845635,16	0,001041088
471	0,99962	3,813E-04	1336464,05	0,001022932
472	0,99954	4,646E-04	1096759,07	0,001022803
473	0,99943	5,659E-04	900431,78	0,001022871
474	0,99931	6,890E-04	739564,55	0,001023177
475	0,99916	8,386E-04	607697,29	0,001023772
500	0,90477	9,523E-02	5351,18	0,00205296
550	0,00000	1,000E+00	509,59	0,021656075

e. *Perhitungan Age Replacement Valve Gp-Sol pada HEX-012*

Dengan nilai α sebesar 968,2, β sebesar 82,28, MTTF sebesar 962,71, MTTR sama dengan Tf sebesar 16,12, dan Tp sebesar 4, maka nilai masing-masing R(tp), F(tp), M(tp) dan D(tp) antara lain.

Tabel 24. *Age Replacement Valve Gp-Sol HEX-012*

tp	R(tp)	F(tp)	M(tp)	D(tp)
850	0,99998	2,225E-05	43263111,44	0,002201953
895	0,99845	1,550E-03	620925,75	0,002160244
896	0,99830	1,700E-03	566458,89	0,002160209
897	0,99814	1,863E-03	516826,43	0,002160281
898	0,99796	2,041E-03	471594,58	0,002160469
899	0,99776	2,237E-03	430368,91	0,002160785
900	0,99755	2,451E-03	392790,71	0,00216124

f. *Perhitungan Age Replacement Sensor As-Level pada HEX-012*

Dengan nilai α sebesar 1257, β sebesar 74,13, MTTF sebesar 1249,87. MTTR sama dengan Tf yaitu sebesar 11,99, dan Tp sebesar 1, maka nilai masing-masing R(tp), F(tp), M(tp) dan D(tp) antara lain.

Tabel 25. *Age Replacement Sensor As-Level HEX-012*

tp	R(tp)	F(tp)	M(tp)	D(tp)
1100	0,99995	5,066E-05	24669493,34	0,000425621
1135	0,99948	5,164E-04	2420237,18	0,000421616
1136	0,99945	5,513E-04	2267320,97	0,000421606
1137	0,99941	5,884E-04	2124190,84	0,000421608
1138	0,99937	6,280E-04	1990212,72	0,000421622
1150	0,99863	1,366E-03	914860,56	0,000423044
1200	0,96845	3,155E-02	39611,99	0,000558047
1250	0,51632	4,837E-01	2584,11	0,003321219
1300	0,00001	1,000E+00	1249,88	0,009501744

7. Klasifikasi Komponen Kritis

Setelah diketahui nilai MTTR dan MTTF dari tiap komponen kritis maka tiap komponen kritis akan diklasifikasikan menurut jenis yang dapat diperbaiki (*repairable*) dan yang tidak dapat diperbaiki (*non repairable*) sebagai berikut.

Tabel 26. *Klasifikasi Komponen Kritis*

Mesin Kritis	Komponen Kritis	Kategori	Harga Komponen (\$)
HEX-004	<i>Element-Fuel</i>	<i>Non Repairable</i>	26,79
	<i>Seal Gp-Duo Cone</i>	<i>Non Repairable</i>	118,31
	<i>Valve Gp-Sol</i>	<i>Non Repairable</i>	64,02
HEX-012	<i>Element-Fuel</i>	<i>Non Repairable</i>	26,79
	<i>Valve Gp-Sol</i>	<i>Non Repairable</i>	64,02
	<i>Sensor As-Level</i>	<i>Non Repairable</i>	50,15

8. Perhitungan Jumlah Suku Cadang dengan Metode Reliability Centered Spares

a. Perhitungan jumlah suku cadang non repairable

Berikut contoh perhitungan λt suku cadang minimum yang harus dipersiapkan per tahun untuk kategori suku cadang *non repairable*.

Tabel 27. *Contoh Perhitungan λt dari Suku Cadang Non Repairable*

Field ID	HEX-004	
Suku Cadang	<i>Element-Fuel</i>	
MTTF	515,88	jam
A	1	buah
P	95%	
N	1	buah
T	12	bulan
M	600	jam/bulan
λt	13,96	

Berikut contoh perhitungan jumlah suku cadang minimum yang harus dipersiapkan per tahun untuk kategori suku cadang *non repairable*.

Tabel 28. *Contoh Perhitungan Jumlah Minimum Suku Cadang Non Repairable*

n	fact(n-1)	exp(- λt)	$\lambda t/n!$	P	P (%)
0	1	8,7E-07	1,00	8,68E-07	0,0%
1	1	8,7E-07	13,96	1,30E-05	0,0%
2	2	8,7E-07	97,40	9,76E-05	0,0%
3	6	8,7E-07	453,11	4,91E-04	0,0%
4	24	8,7E-07	1580,97	1,86E-03	0,2%
5	120	8,7E-07	4413,04	5,70E-03	0,6%
6	720	8,7E-07	10265,27	1,46E-02	1,5%
7	5040	8,7E-07	20467,09	3,24E-02	3,2%
8	40320	8,7E-07	35706,72	6,34E-02	6,3%
9	362880	8,7E-07	55372,13	1,11E-01	11,1%
10	3,6E+06	8,7E-07	77281,41	1,79E-01	17,9%
11	4,0E+07	8,7E-07	98054,19	2,64E-01	26,4%
12	4,8E+08	8,7E-07	114043,02	3,63E-01	36,3%
13	6,2E+09	8,7E-07	122436,01	4,69E-01	46,9%
14	8,7E+10	8,7E-07	122057,63	5,75E-01	57,5%
15	1,3E+12	8,7E-07	113568,39	6,74E-01	67,4%
16	2,1E+13	8,7E-07	99065,24	7,60E-01	76,0%
17	3,6E+14	8,7E-07	81331,01	8,30E-01	83,0%
18	6,4E+15	8,7E-07	63061,96	8,85E-01	88,5%
19	1,2E+17	8,7E-07	46323,11	9,25E-01	92,5%
20	2,4E+18	8,7E-07	32325,96	9,53E-01	95,3%
21	5,1E+19	8,7E-07	21484,04	9,72E-01	97,2%
22	1,1E+21	8,7E-07	13629,41	9,84E-01	98,4%

Dari contoh hasil perhitungan di atas diketahui bahwa jumlah suku cadang minimum yang harus dipersiapkan tiap tahunnya sebanyak 20 unit.

Rekapitulasi kebutuhan suku cadang kritis pada *excavator* dengan kode HEX-004 selama setahun dengan konversi mata uang sebesar Rp 14.073,80 per tanggal 22 Januari 2021 adalah sebagai berikut

Tabel 29. *Rekapitulasi Kebutuhan Suku Cadang Kritis HEX-004*

Suku Cadang Kritis	Kebutuhan Suku Cadang (Item per Tahun)	Harga Satuan Suku Cadang	Total Harga Suku Cadang	Total (Rp)
<i>Element-Fuel</i>	20	26,79	535,80	7.540.742,04
<i>Seal Gp-Duo Cone</i>	12	118,31	1.419,72	19.980.855,34
<i>Valve Gp-Sol</i>	11	64,02	704,22	9.911.051,44
Total	43		2.659,74	37.432.648,81

Rekapitulasi kebutuhan suku cadang kritis pada *excavator* dengan kode HEX-012 selama setahun dengan konversi mata uang sebesar Rp 14.073,80 per tanggal 22 Januari 2021 adalah sebagai berikut

Tabel 30. Rekapitulasi Kebutuhan Suku Cadang Kritis HEX-012

Suku Cadang Kritis	Kebutuhan Suku Cadang (Item per Tahun)	Harga Satuan Suku Cadang	Total Harga Suku Cadang	Total (Rp)
<i>Element-Fuel Valve Gp-Sol Sensor As-Level</i>	21	26,79	562,59	7.917.779,14
	12	64,02	768,24	10.812.056,11
	10	50,15	501,50	7.058.010,70
Total	43		1.832,33	25.787.845,95

9. Perhitungan Nilai Risk Priority Number

Nilai *Risk Priority Number* (RPN) dari tiap mode kegagalan pada sistem dan efek yang ditimbulkan dalam penggantian komponen adalah sebagai berikut.

Tabel 31. Nilai RPN Komponen Kritis

Mesin Kritis	Komponen Kritis	Kode FF	Kode FM	S	O	D	RPN
HEX-004	<i>Element-Fuel</i>	A	1	9	9	4	324
			2	7	9	4	252
	<i>Seal Gp-Duo Cone Valve Gp-Sol</i>	A	1	8	8	4	256
			2	8	8	4	256
HEX-012	<i>Element-Fuel</i>	A	1	9	9	4	324
			2	7	9	4	252
	<i>Valve Gp-Sol</i>	A	1	8	8	4	256
			2	8	8	4	256
	<i>Sensor As-Level</i>	A	1	7	8	5	280
			2	7	8	5	280
B			1	7	8	5	280
		C	1	5	8	5	200

Usulan perbaikan berdasarkan hasil perhitungan RPN serta *Failure Mode and Effect Analysis* adalah pada *seal gp-duo cone* dengan mengecek oli *final drive* dengan *Scheduled Oil Sampling*, *element-fuel* dengan menjaga kebersihan fuel yang akan diisikan ke tangki bahan bakar sesuai standar ISO4406:2021, serta *valve gp-sol* dan *sensor as-level* adalah mengecek *active event* pada *memory Electronic Control Module*.

10. Penyusunan RCM Decision Worksheet

Dari tabel hasil *Failure Mode and Effect Analysis* tersebut maka dapat dibuat *RCM Decision Worksheet* dari *excavator* dengan kode HEX-004 sebagai berikut.

RCM Decision		System : 320GC - ZBT (HEX-004)										
		Subsystem : Machine Ar										
Information Reference	Consequence	H1	H2	H3	S1	S2	S3	Default Task	Proposed Task	Initial Interval	Can be Done by	
												Evaluation
1 A	1	Y	N	N	Y	N	N	Y	Schedule discarded task	463	Technician	
1 A	2	Y	N	N	Y	N	N	Y	Schedule discarded task	463	Technician	
2 A	1	Y	N	Y	N	N	Y	Schedule discarded task	882	Technician		
2 A	2	Y	N	Y	N	N	Y	Schedule discarded task	882	Technician		
3 A	1	Y	N	N	Y	N	N	Y	Schedule discarded task	1025	Technician	
3 A	2	Y	N	N	Y	N	N	Y	Schedule discarded task	1025	Technician	

Gambar 4. RCM Decision Worksheet HEX-004

Dari tabel hasil *Failure Mode and Effect Analysis* tersebut maka dapat dibuat *RCM Decision Worksheet* dari *excavator* dengan kode HEX-012 sebagai berikut.

RCM Decision		System : 320GC - ZBT (HEX-012)										
		Subsystem : Machine Ar										
Information Reference	Consequence	H1	H2	H3	S1	S2	S3	Default Task	Proposed Task	Initial Interval	Can be Done by	
												Evaluation
1 A	1	Y	N	N	Y	N	N	Y	Schedule discarded task	472	Technician	
1 A	2	Y	N	N	Y	N	N	Y	Schedule discarded task	472	Technician	
2 A	1	Y	N	N	Y	N	N	Y	Schedule discarded task	896	Technician	
2 A	2	Y	N	N	Y	N	N	Y	Schedule discarded task	896	Technician	
3 A	1	Y	N	N	Y	N	N	Y	Schedule discarded task	1136	Technician	
3 A	2	Y	N	N	Y	N	N	Y	Schedule discarded task	1136	Technician	
3 B	1	Y	N	N	Y	N	N	Y	Schedule discarded task	1136	Technician	
3 B	2	Y	N	N	Y	N	N	Y	Schedule discarded task	1136	Technician	
3 C	1	Y	N	N	Y	N	N	Y	Schedule discarded task	1136	Technician	

Gambar 5. RCM Decision Worksheet HEX-012

11. Perhitungan Total Biaya Perawatan

Dari tabel di atas dapat dihitung biaya perawatan masing-masing suku cadang sebagai berikut.

Tabel 32. Biaya dalam Proses Perawatan

Mesin Kritis	Komponen Kritis	Cp (\$)	Cf (\$)
HEX-004	<i>Element-Fuel</i>	70,00	28.166,25
	<i>Seal Gp-Duo Cone</i>	660,39	44.538,79
	<i>Valve Gp-Sol</i>	118,93	51.121,09
HEX-012	<i>Element-Fuel</i>	70,00	33.788,79
	<i>Valve Gp-Sol</i>	118,93	48.279,92
	<i>Sensor As-Level</i>	74,78	35.908,76
	Total	1.113,03	241.803,60

Cf adalah biaya perbaikan atau penggantian karena kerusakan komponen, A adalah biaya teknisi per jam, B adalah biaya kerugian produksi (*loss revenue*) per jam, C adalah waktu perbaikan kerusakan dalam jam, D adalah biaya pembelian komponen, Cp adalah biaya yang dikeluarkan untuk pemeliharaan.

Dari tabel 32 diatas maka dapat dihitung nilai penghematan atas strategi perawatan yang selama ini dijalankan perusahaan dibandingkan dengan strategi usulan pada HEX-004 sebagai berikut.

Tabel 33. Penghematan dalam Proses Perawatan HEX-004

Komponen Kritis	Tc(tp) (Rp/jam)	Tc(tf) (Rp/jam)	ΔTC (Rp)
<i>Element-Fuel</i>	2.948,18	768.407,82	765.459,64
<i>Seal Gp-Duo Cone</i>	11.248,11	648.899,14	637.651,03
<i>Valve Gp-Sol</i>	2.803,30	651.279,07	648.475,78
Total	16.999,58	2.068.586,03	2.051.586,45

Dari tabel 32 di atas maka dapat dihitung nilai penghematan atas strategi perawatan yang selama ini dijalankan perusahaan dibandingkan dengan strategi usulan pada HEX-012 sebagai berikut.

Tabel 34. Penghematan dalam Proses Perawatan HEX-012

Komponen Kritis	Tc(tp) (Rp/jam)	Tc(tf) (Rp/jam)	Δ TC (Rp)
<i>Element-Fuel</i>	2.554,27	933.175,01	930.620,75
<i>Valve Gp-Sol</i>	3.153,34	705.801,20	702.647,86
<i>Sensor As-Level</i>	1.171,10	404.340,25	403.169,15
Total	6.878,71	2.043.316,46	2.036.437,75

IV. CONCLUSIONS

Simpulan dari penelitian ini antara lain strategi perawatan yang tepat sesuai metode *Reliability Centered Maintenance* adalah *schedule discard task*. Waktu yang tepat untuk perawatan dan kebutuhan parts per tahun sesuai metode *Age Replacement* dan *Reliability Centered Spares* pada HEX-004 adalah *element-fuel* pada 463 jam dan 20 unit, *seal gp-duo cone* pada 882 jam dan 12 unit, serta *valve gp-sol* pada 1025 jam dan 11 unit. Pada HEX-012 *element-fuel* pada 472 jam dan 21 unit, *valve gp-sol* pada 896 jam dan 12 unit, serta *sensor as-level* pada 1136 jam dan 10 unit. Total penghematan dari strategi yang diusulkan sebesar \$ 290,47 atau Rp 4.088.024,21 per jam. Usulan perbaikan pada *seal gp-duo cone* dengan mengecek oli *final drive* dengan *Scheduled Oil Sampling*, *element-fuel* dengan menjaga kebersihan fuel yang akan diisikan ke tangki bahan bakar sesuai standar ISO4406:2021, serta *valve gp-sol* dan *sensor as-level* adalah mengecek *active event* pada *memory Electronic Control Module*.

REFERENCES

- [1] Kementerian ESDM, "Capaian Kinerja 2019 dan Program 2020," 2020.
- [2] Bank Indonesia, "Laporan Perekonomian Indonesia 2019," 2020.
- [3] F. B. Pradana, "Menangkap Potensi 'Besar' dari Bisnis Alat Berat," *Kompasiana.com*. 2017, [Online]. Available: <https://www.kompasiana.com/farizbagusp/5a35b82ccf01b45bad56c404/menangkap-potensi-besar-dari-bisnis-alat-berat?page=all>.
- [4] H. Bhatia, "6.8 Million Connected Heavy Construction Machines to be Shipped till 2025," *Counterpoint*, 2019.
- [5] K. Peng, *Equipment Management in the Post-Maintenance Era*. 2012.
- [6] A. Birolini, *Reliability Engineering Theory and Practice 8th Edition*. 2017.
- [7] J. D. Campbell and J. V. Reyes-Picknell, *Uptime: Strategies for Excellence in Maintenance Management*. 2016.
- [8] E. Bradley, *Reliability Engineering: A life Cycle Approach*. 2017.
- [9] B. S. Dhillon, *Engineering systems reliability, safety, and maintenance: An integrated approach*. 2017.

- [10] T. Jin, *Reliability Engineering and Services*. 2019.
- [11] D. Galar, P. Sandborn, and U. Kumar, *Maintenance Costs and Life Cycle Cost Analysis*. 2017.
- [12] S. O. Duffuaa and A. Raouf, *Planning and Control of Maintenance Systems*. 2015.