

PENJADWALAN PERAWATAN PADA SISTEM PENDINGIN MAIN ENGINE KAPAL TSHD KING ARTHUR 8 DENGAN PEMODELAN DINAMIKA SISTEM

Ainuddin Mirsyad Hartanto ^{1*}, Edi Haryono ², Nurvita Arumsari ³

Program Studi D-IV Teknik Permesinan Kapal, Jurusan Teknik Permesinan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri
Surabaya, Jawa Timur, Indonesia^{1*}

Program Studi D-IV Teknik Permesinan Kapal, Jurusan Teknik Permesinan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri
Surabaya, Jawa Timur, Indonesia²

Program Studi D-IV Teknik Permesinan Kapal, Jurusan Teknik Permesinan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri
Surabaya, Jawa Timur, Indonesia³

Email: ainuddinn@gmail.com^{1*}; edi_haryono@ppns.ac.id^{2*}; arum@ppns.ac.id^{3*}

Abstract - The Trailing Suction Hopper Dredger is a dredger that can solve problems that often arise in port shipping channels, namely sedimentation or silting. TSHD ships are expected to be able to carry out their functions without failure, where all aspects that influence failure must be anticipated, especially failures in the main engine cooling system. Therefore, in this research, maintenance scheduling was carried out on the main engine cooling system components of the TSHD King Arthur 8 ship by identifying failures using Fault Tree Analysis (FTA), calculating component and system reliability values, and modeling system dynamics (dynamic simulation) using Powersim Studio software. After that, determine the maintenance scheduling strategy based on the most optimum maintenance cost analysis. From the research results, it was found that there were 12 components that caused the failure of the ship's main engine cooling system, of which one component, namely the fw cooler, had the lowest reliability value of 0.60007 at 720 hours. Based on the results of system dynamics modeling, a preventive maintenance strategy is more effective for the components of globe valve ps, strainer ps, globe valve sb, strainer sb, sw pump, fw pump, thermostatic valve, inlet water main pipe, outlet water main pipe, water cooled insulation cover, and expansion water tank because the costs incurred are lower than corrective maintenance. Meanwhile, for the fw cooler component, corrective maintenance was chosen because the costs incurred are lower than preventive maintenance.

Keywords: FTA (Fault Tree Analysis), Reliability, Dynamic Simulation, Maintenance Scheduling, Maintenance Cost

1. PENDAHULUAN

Alur pelayaran merupakan komponen pelabuhan penting sebagai jalur masuk dan keluar kapal yang didesain untuk dapat dilalui oleh kapal yang ditargetkan. Permasalahan yang sering muncul di alur pelayaran pelabuhan adalah sedimentasi yang dapat menyebabkan terjadinya pendangkalan [1]. Pendangkalan dapat diatasi dengan cara pengerukan yang menggunakan kapal keruk tipe *hopper dredger* (TSHD). Kapal TSHD King Arthur 8 merupakan *Trailing Suction Hopper Dredger* dengan kapasitas *hopper* 4.038,09 m³ dan telah memiliki kapasitas penyelesaian pekerjaan pengerukan seperti pekerjaan pengerukan di Pelabuhan Teluk Lamong, Semen Indonesia Tuban, Pelabuhan Nilam, PLTU Lontar, dan menemukan *Black Box* Sriwijaya Air di kepulauan Seribu.

King Arthur 8 diharapkan dapat menjalankan fungsinya tanpa gagal. Segala aspek yang mempengaruhi kegagalan harus diantisipasi terutama kegagalan pada *main engine*. Sistem pendingin merupakan salah satu sistem penunjang *main engine* yang harus diperhatikan perawatan komponen-komponennya agar dapat beroperasi

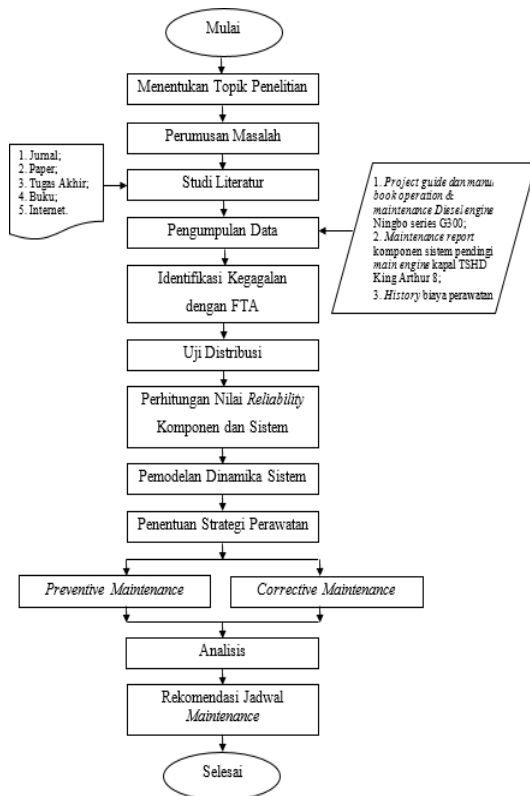
dengan baik dan tidak terjadi *overheating*. Jika perawatan pada komponen-komponen yang ada tidak direncanakan dengan baik maka akan berakibat pada menurunnya kinerja kapal itu sendiri.

Dalam penelitian ini akan dilakukan identifikasi kegagalan *Fault Tree Analysis* (FTA) pada tiap komponen, perhitungan nilai *reliability*, pemodelan dinamika sistem (simulasi dinamis), dan penentuan strategi penjadwalan perawatan. Strategi penjadwalan perawatan yang terpilih akan dibandingkan berdasarkan optimalisasi biaya dan diharapkan akan mendapatkan yang terbaik untuk setiap komponennya.

2. METODOLOGI

2.1 Diagram Alir Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan tahapan-tahapan sebagai berikut.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

2.2 Fault Tree Analysis (FTA)

Fault Tree Analysis (FTA) adalah sebuah

metode untuk mengidentifikasi kegagalan (*failure*) dari suatu sistem, baik yang disebabkan oleh kegagalan lainnya secara bersama-sama atau secara individu. Dengan metode FTA maka dapat diketahui kegagalan-kegagalan yang menjadi penyebab dan probabilitas terjadinya *undesired event* [2].

2.3 Keandalan (Reliability)

Nilai *reliability* suatu komponen atau sistem bukan merupakan suatu nilai yang tetap. Nilai tersebut akan berkurang seiring dengan berjalannya waktu masa pakai suatu komponen atau sistem tersebut. Pada analisis kegagalan, waktu kegagalan (*time to failure/TTF*) sering digunakan sebagai variabel random (t). Probabilitas kegagalan saat $t = 0$ adalah 0, dan cenderung mendekati 1 pada $t = \infty$. Fungsi distribusi kumulatif ($Q(t)$) mengukur probabilitas kegagalan sebagai fungsi waktu, dan hubungannya dengan fungsi keandalan $R(t)$ dinyatakan dengan rumus berikut.

$$R(t) = 1 - Q(t) \quad (1)$$

Distribusi 3 parameter Weibull adalah distribusi probabilitas yang digunakan untuk menggambarkan waktu antar kegagalan pada suatu sistem. Distribusi ini memiliki tiga parameter, yaitu *scale* (α), parameter *location* (γ), dan parameter *shape* (β) [3].

Cumulative Failure Distribution

$$F(t) = 1 - \left(e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\alpha}\right)^\beta} \right) \quad (2)$$

Fungsi Keandalan

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\alpha}\right)^\beta} \quad (3)$$

Mean Time To Failure (MTTF)

$$MTTF = \gamma + \alpha \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \quad (4)$$

Failure Rate

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t-\gamma}{\alpha}\right)^{\beta-1} \quad (5)$$

Distribusi 2 parameter Weibull adalah distribusi probabilitas yang digunakan untuk menggambarkan waktu antar kegagalan pada suatu sistem. Distribusi ini memiliki dua parameter, yaitu *scale* (α) dan parameter *shape* (β).

Cumulative Failure Distribution

$$F(t) = 1 - \left(e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta} \right) \quad (6)$$

Fungsi Keandalan

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta} \quad (7)$$

Mean Time To Failure (MTTF)

$$MTTF = \alpha \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \quad (8)$$

Failure Rate

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta-1} \quad (9)$$

Distribusi eksponensial memiliki laju kerusakan yang konstan terhadap waktu. Distribusi ini paling mudah untuk dianalisis. Parameter distribusi yang digunakan adalah λ (laju kerusakan), yang menunjukkan rata-rata kedatangan kerusakan yang terjadi.

Cumulative Failure Distribution

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (10)$$

Fungsi Keandalan

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (11)$$

Mean Time To Failure (MTTF)

$$MTTF = 1/\lambda \quad (12)$$

Parameter yang digunakan distribusi normal adalah μ (nilai rata rata) dan σ (standar deviasi). Distribusi normal seringkali disebut dengan *Gaussian Distribution*, dimana distribusi ini memiliki ciri simetris di sekitar rata-rata dengan sebaran di distribusi yang ditentukan oleh σ . Fungsi dari distribusi normal adalah sebagai berikut.

Cumulative Failure Distribution

$$F(t) = P\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right) \quad (13)$$

Fungsi Keandalan

$$R(t) = 1 - P\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right) \quad (14)$$

Mean Time To Failure (MTTF)

$$MTTF = \mu \quad (15)$$

Failure Rate

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (16)$$

Distribusi Lognormal menggunakan dua parameter yaitu μ sebagai parameter bentuk (*shape parameter*) dan σ sebagai parameter lokasi (*location parameter*) yang merupakan nilai tengah dari suatu distribusi kerusakan. Fungsi dari distribusi lognormal adalah sebagai berikut.

Cumulative Failure Distribution

$$F(t) = P\left(\frac{\ln(t) - \mu}{\sigma}\right) \quad (17)$$

Fungsi Keandalan

$$R(t) = 1 - P\left(\frac{\ln(t) - \mu}{\sigma}\right) \quad (18)$$

Mean Time To Failure (MTTF)

$$MTTF = \exp(\mu + \sigma^2 / 2) \quad (19)$$

Failure Rate

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (20)$$

2.4 Pemodelan Dinamika Sistem

Dinamika sistem merupakan metodologi pemodelan untuk memahami sistem yang kompleks dan menganalisis perilaku dinamisnya. Dengan simulasi dinamika sistem, dapat diperoleh perubahan indeks keandalan dari komponen-komponen dalam sebuah sistem dari waktu ke waktu. Untuk memodelkan suatu sistem yang kompleks dengan metode dinamika sistem, Forrester (1961) merumuskan empat langkah, yakni mendefinisikan masalah, membuat *causal diagram*, membuat *stock and flow diagram*, simulasi dan hasil [4].

2.5 Penjadwalan Perawatan

Perawatan adalah kegiatan memelihara barang atau peralatan agar tetap berfungsi dengan baik. Penjadwalan perawatan dapat bersifat terencana atau pencegahan. Ada dua macam penjadwalan terjadwal, yaitu berdasarkan kalender dan lama aset beroperasi.

Corrective maintenance merupakan perawatan yang dilakukan setelah peralatan mengalami kegagalan dan perawatan ini bertujuan untuk mengembalikan sistem agar sistem tersebut dapat melakukan fungsinya kembali [5].

Preventive maintenance merupakan sebuah strategi pemeliharaan atau perawatan komponen

yang terencana. Tujuan dari tindakan ini yaitu untuk mengantisipasi terjadinya kerusakan atau kegagalan sebelum masalah tersebut benar-benar terjadi [6]. Berdasarkan nilai *Reliability Lower Limit Maintenance (RLLM)* yakni 0.6 atau 60% [7]. Komponen dengan nilai keandalan yang melewati batas nilai keandalan sebesar 0.6 akan diterapkan strategi penjadwalan baru yaitu *preventive maintenance*.

2.6 Biaya Interval Perawatan

Total biaya perawatan merupakan gabungan dari beberapa komponen, yaitu biaya man hours (CW), biaya konsekuensi operasional (CO), dan biaya penggantian komponen (CF). Cara menghitungnya dapat menggunakan rumus berikut.

$$CR = CF + ((CW + CO) \cdot MTTR) \quad (21)$$

2.7 Analisis Total Biaya Minimum

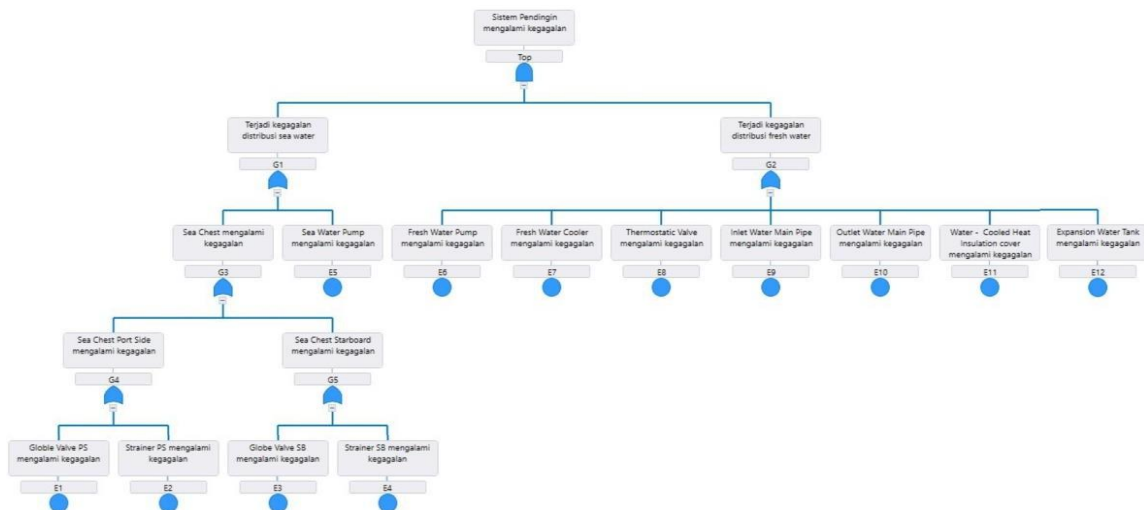
Perawatan yang efektif akan dilakukan secara terjadwal dan saat mesin sedang tidak beroperasi dalam proses produksi. Semakin sering perawatan dilakukan, maka biaya perawatan cenderung meningkat. Namun, jika perawatan diabaikan, maka kinerja mesin dapat menurun. Sehingga pola *maintenance* yang optimal perlu diketahui agar terdapat keseimbangan antara biaya perawatan dan biaya kerusakan pada total *cost* yang paling minimal.

$$Tc_{(tp)} = \frac{Cp R(tp) + Cf(1-R(tp))}{tp R(tp) + \int_0^{tp} t f(t) dt} \quad (22)$$

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Identifikasi Kegagalan dengan FTA

Pada *main engine* kapal TSHD King Arthur 8 terdapat beberapa komponen yang membentuk sistem tersebut. Kegagalan-kegagalan yang terjadi pada beberapa komponen tersebut mengakibatkan kegagalan pada sistem pendingin *main engine* kapal. Untuk mengetahui penyebab kegagalan dalam sistem pendingin maka dilakukan identifikasi menggunakan *Fault Tree Analysis (FTA)* berikut.

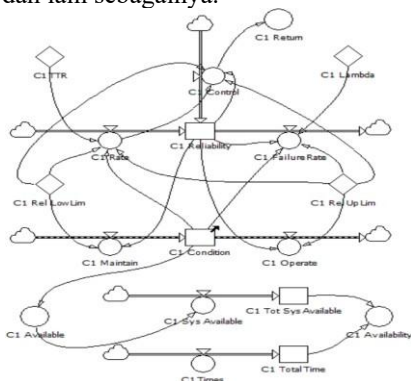


Gambar 2. FTA Sistem Pendingin *Main Engine* Kapal TSHD King Arthur 8

Berdasarkan hasil identifikasi FTA diketahui bahwa terdapat 12 komponen yang merupakan *basic event* yaitu *Globe Valve PS*, *Strainer PS*, *Globe Valve SB*, dan *Strainer SB* mengalami keretakan dan tersumbat. *SW Pump* dan *FW Pump* mengalami kerusakan pada gasket karena aus, kerusakan impeller, dan kebocoran. *FW Cooler* mengalami kebocoran, kerusakan pada *tube cooler*, *cover*, *pressure* dan *temperature gauge*. *Thermostatic Valve* mengalami tersumbat, tidak bisa kedap karena berkerak, dan tidak bisa membuka secara proporsional. *Inlet Water Main Pipe* dan *Outlet Water Main Pipe* mengalami kebocoran pada pipa sambungan *flange* karena retak. *Water Cooled Insulation Cover* mengalami kebocoran pada cover, dan *Expansion Water Tank* mengalami korosi.

3.2 Pemodelan Dinamika Sistem

Pemodelan dinamika sistem digunakan untuk membuat simulasi model analisis keandalan, ketersediaan, dan jadwal perawatan komponen pada sistem pendingin *main engine* kapal. Beberapa variabel yang mempengaruhi nilai keandalan seperti *failure rate* komponen, *Reliability Lower Limit*, *Reliability Upper Limit*, dan lain sebagainya.



Gambar 3. Simulasi Dinamik Penentuan Interval Pemeliharaan Komponen

Setelah dilakukan simulasi pemodelan seperti pada Gambar 3 dan *running program* dengan *Powersim Studio 10* yang berdasarkan fungsi waktu, akan didapatkan nilai *availability*, *reliability* dan jadwal perawatan dari suatu komponen. Ketika nilai *reliability* dari komponen turun di bawah batas RLLM, kondisi komponen langsung berubah dari “false” menjadi “true” dimana hal ini menunjukkan proses perbaikan dilakukan. Dalam kurun waktu tersebut nilai *reliability* akan meningkat seiring berjalannya waktu namun nilai *availability*-nya menurun karena komponen tidak dapat beroperasi saat perbaikan. Hasil berupa waktu jadwal perawatan yang ditunjukkan pada Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Hasil Simulasi Dinamik

No	Komponen	Waktu Jadwal Perawatan (Jam)
1	Globe Valve PS	2533
2	Strainer PS	2616
3	Globe Valve SB	2533
4	Strainer SB	2616
5	SW Pump	1292
6	FW Pump	952
7	FW Cooler	726
8	Thermostatic Valve	1925
9	Inlet Water Main Pipe	2411
10	Outlet Water Main Pipe	3648
11	Water Cooled Heat Insulation Cover	4257
12	Expansion Water Tank	2566

Berdasarkan Tabel 1 didapatkan waktu penjadwalan perawatan berdasarkan simulasi dinamik dari tiap komponen sistem pendingin *main engine*. Interval waktu tersebut yang menjadi dasar dalam membuat sebuah jadwal perawatan.

3.3 Perbandingan Nilai *Reliability* Komponen dan Sistem

Perhitungan nilai *reliability* komponen dan sistem dilakukan secara *theoretical* dan simulasi dinamik yang ditunjukkan pada Tabel 2 berikut.

Tabel 2. Perbandingan Nilai *Reliability* Komponen secara *Theoretical* dan Simulasi Dinamik

No	Komponen	<i>Theoretical</i>		Simulasi Dinamik	
		t	<i>Reliability</i>	t	<i>Reliability</i>
1	Globe Valve PS	2540	0,60009	2533	0,59973
2	Strainer PS	2610	0,60058	2616	0,59966
3	Globe Valve SB	2540	0,60009	2533	0,59973
4	Strainer SB	2610	0,60058	2616	0,59966
5	SW Pump	1290	0,60160	1292	0,59927
6	FW Pump	950	0,60018	952	0,59884
7	FW Cooler	720	0,60007	726	0,59905
8	Thermostatic Valve	1920	0,60026	1925	0,59941
9	Inlet Water Main Pipe	2410	0,60028	2411	0,59971
10	Outlet Water Main Pipe	3650	0,60049	3648	0,59974
11	Water Cooled Heat Insulation Cover	4250	0,60013	4257	0,59978
12	Expansion Water Tank	2560	0,60026	2566	0,59956

Sedangkan pada $t = 720$ didapatkan perbandingan nilai *reliability* komponen yang ditunjukkan pada Tabel 3 berikut.

Tabel 3. Perbandingan Nilai *Reliability* Komponen secara *Theoretical* dan Simulasi Dinamik saat $t = 720$

No	Komponen	<i>Theoretical</i>		Simulasi Dinamik	
		t	<i>Reliability</i>	t	<i>Reliability</i>
1	Globe Valve PS	720	0,89427	720	0,88624
2	Strainer PS	720	0,90663	720	0,88984
3	Globe Valve SB	720	0,89427	720	0,88624
4	Strainer SB	720	0,90663	720	0,88984
5	SW Pump	720	0,72528	720	0,77680
6	FW Pump	720	0,65769	720	0,69688
7	FW Cooler	720	0,60007	720	0,60256
8	Thermostatic Valve	720	0,81246	720	0,85024
9	Inlet Water Main Pipe	720	0,95914	720	0,88048
10	Outlet Water Main Pipe	720	0,91364	720	0,92102
11	Water Cooled Heat Insulation Cover	720	0,98299	720	0,93232
12	Expansion Water Tank	720	1,00000	720	0,88768

Berdasarkan Tabel 2 dan 3 didapatkan bahwa pada $t = 720$, perbandingan nilai *reliability* antara perhitungan *theoretical* dengan simulasi dinamik tidak terlalu jauh. Setelah didapatkan hasil nilai *reliability* komponen, pada Tabel 4 berikut ditunjukkan perbandingan nilai *reliability* sistem antara perhitungan *theoretical* dan simulasi dinamik.

Tabel 4. Perbandingan Nilai *Reliability* Sistem secara *Theoretical* dan Simulasi Dinamik saat $t = 720$

No	Nilai <i>Reliability</i> Sistem (<i>Theoretical</i>)	Nilai <i>Reliability</i> Sistem (Simulasi Dinamik)
1	0,62128	0,60695

Berdasarkan Tabel 4.9 didapatkan bahwa nilai *reliability* sistem secara *theoretical* sebesar 0,62128 dan nilai *reliability* sistem simulasi dinamik sebesar 0,60695.

3.4 Penentuan Strategi Perawatan

Hasil penjadwalan perawatan dengan pemodelan dinamika sistem berupa interval waktu pemeliharaan, sehingga strategi yang dipilih adalah *preventive maintenance*. Perencanaan jadwal perawatan tiap komponen sistem pendingin *main engine* ditunjukkan pada Tabel 5 berikut.

Tabel 5. Rencana Jadwal Perawatan Komponen

No	Komponen	Waktu Jadwal Perawatan (Jam)	Frekuensi Perawatan (Per Tahun)
1	Globe Valve PS	2533	2,96
2	Strainer PS	2616	2,86
3	Globe Valve SB	2533	2,96
4	Strainer SB	2616	2,86
5	SW Pump	1292	5,80
6	FW Pump	952	7,87
7	FW Cooler	726	10,31
8	Thermostatic Valve	1925	3,89
9	Inlet Water Main Pipe	2411	3,11
10	Outlet Water Main Pipe	3648	2,05
11	Water Cooled Heat Insulation Cover	4257	1,76
12	Expansion Water Tank	2566	2,92

Jam kerja operasional mesin selama 24 jam sehari atau 7488 jam dalam setahun. Berdasarkan Tabel 5 didapatkan bahwa waktu interval terbesar adalah *water cooled heat insulation cover* dengan waktu jadwal perawatan 4257 jam atau frekuensi perawatan 1,76 kali per tahun dan waktu interval terkecil adalah *fw cooler* dengan waktu jadwal perawatan 726 jam atau 10,31 kali per tahun.

3.5 Perbandingan Biaya Perawatan

Tujuan dari perhitungan biaya perawatan adalah untuk mengetahui dan memprediksi berapa biaya yang harus dikeluarkan sebelum maupun sesudah dilakukannya evaluasi jadwal perawatan. Perhitungan biaya perawatan dapat menggunakan rumus (21). Setelah didapatkan total biaya perawatan dari masing-masing komponen, selanjutnya dilakukan analisis perbandingan antara biaya perawatan *corrective* maupun *preventive maintenance* dengan tujuan dapat memilih jenis *maintenance* mana yang lebih baik dan efisien. Biaya perawatan *corrective maintenance* dan *preventive maintenance* tiap komponen ditunjukkan pada Tabel 6 berikut.

Tabel 6. Perbandingan Biaya Perawatan *Corrective Maintenance* dan *Preventive Maintenance*

No	Komponen	<i>Corrective Maintenance</i>	<i>Preventive Maintenance</i>	Jenis <i>Maintenance</i> yang dipilih
1	Globe Valve PS	Rp 52.818.181	Rp 21.768.223	Preventive
2	Strainer PS	Rp 71.825.758	Rp 21.272.727	Preventive
3	Globe Valve SB	Rp 52.818.181	Rp 21.768.223	Preventive
4	Strainer SB	Rp 71.825.758	Rp 21.272.727	Preventive
5	SW Pump	Rp 76.609.375	Rp 52.794.892	Preventive
6	FW Pump	Rp 83.021.635	Rp 73.178.571	Preventive
7	FW Cooler	Rp 49.294.271	Rp 65.778.926	Corrective
8	Thermostatic Valve	Rp 76.883.333	Rp 33.258.390	Preventive
9	Inlet Water Main Pipe	Rp 19.526.042	Rp 11.468.685	Preventive
10	Outlet Water Main Pipe	Rp 20.395.833	Rp 7.654.605	Preventive
11	Water Cooled Insulation Cover	Rp 80.781.250	Rp 10.169.133	Preventive
12	Expansion Water Tank	Rp 46.437.500	Rp 13.922.058	Preventive

Berdasarkan Tabel 6 diketahui bahwa strategi perawatan terbaik untuk komponen *Globe Valve PS*, *Strainer PS*, *Globe Valve SB*, *Strainer SB*, *SW Pump*, *FW Pump*, *Thermostatic Valve*, *Inlet Water Main Pipe*, *Outlet Water Main Pipe*, *Water Cooled Insulation Cover*, dan *Expansion Water Tank* adalah *preventive maintenance* karena dari segi biaya yang dikeluarkan lebih kecil dibandingkan *corrective maintenance*. Sedangkan strategi perawatan terbaik untuk komponen *FW Cooler* adalah *corrective maintenance* karena dari segi biaya yang dikeluarkan lebih kecil dibandingkan *preventive maintenance*.

3.6 Analisis Total Biaya Minimum

Analisis total biaya minimum dilakukan untuk mendapatkan pola *maintenance* yang optimal, dimana perlu dicari keseimbangan antara biaya perawatan dan biaya kerusakan pada *total cost* yang paling minimal. Komponen yang memiliki ekspektasi total biaya minimum terbesar pada metode *theoretical* adalah komponen *fw pump* yaitu sebesar Rp 6.659.136 saat $R = 0,8$, biaya sebesar Rp 20.301.640 saat $R = 0,6$, dan biaya sebesar Rp 43.391.570 saat $R = 0,4$. Sedangkan komponen yang memiliki ekspektasi total biaya minimum terkecil adalah komponen *inlet water main pipe* yaitu sebesar Rp 3.769.347 saat $R = 0,8$, biaya sebesar Rp 6.532.005 saat $R = 0,6$, dan biaya sebesar Rp 10.892.386 saat $R = 0,4$.

Komponen yang memiliki ekspektasi total biaya minimum terbesar pada metode simulasi dinamik adalah komponen *fw pump* yaitu sebesar Rp 6.786.239 saat $R = 0,8$, biaya sebesar Rp 20.348.295 saat $R = 0,6$, dan biaya sebesar Rp 43.482.971 saat $R = 0,4$. Sedangkan komponen yang memiliki ekspektasi total biaya minimum terkecil adalah komponen *inlet water main pipe* yaitu sebesar Rp 3.770.351 saat $R = 0,8$, biaya sebesar Rp 6.537.628 saat $R = 0,6$, dan biaya sebesar Rp 10.904.831 saat $R = 0,4$.

Perbandingan selisih ekspektasi biaya minimum tiap komponen pada metode *theoretical*

dan simulasi dinamik menghasilkan persentase *error* dibawah 10%.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perhitungan dan analisis yang dilakukan, diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Dari hasil analisis FTA teridentifikasi 12 komponen penyebab kegagalan pada sistem pendingin *main engine* kapal TSHD King Arthur 8 yaitu, *Globe Valve PS*, *Strainer PS*, *Globe Valve SB*, *Strainer SB*, *SW Pump*, *FW Pump*, *FW Cooler*, *Thermostatic Valve*, *Inlet Water Main Pipe*, *Outlet Water Main Pipe*, *Water Cooled Insulation Cover*, dan *Expansion Water Tank*.
2. Berdasarkan perhitungan nilai *reliability* secara *theoretical* pada waktu 720 jam, didapatkan nilai *reliability* komponen terkecil atau paling kritis adalah *FW Cooler* dengan nilai *reliability* sebesar 0,60007 dan nilai *reliability* sistem sebesar 0,62128. Sedangkan berdasarkan hasil simulasi dinamik, pada waktu 720 jam didapatkan nilai *reliability* komponen terkecil adalah *FW Cooler* dengan nilai keandalan sebesar 0,60256 dan nilai *reliability* sistem sebesar 0,60695.
3. Berdasarkan hasil pemodelan dinamika sistem, komponen *Globe Valve PS* disarankan dilakukan pemeliharaan sesuai pendekatan sistem dinamik pada waktu 2355 jam, komponen *Strainer PS* pada waktu 2616 jam, komponen *Globe Valve SB* pada waktu 2533 jam, komponene *Strainer SB* pada waktu 2616 jam, komponen *SW Pump* pada waktu 1292 jam, komponen *FW Pump* pada waktu 952 jam, komponen *FW Cooler* pada waktu 726 jam, komponen *Thermostatic Valve* pada waktu 1925 jam, komponen *Inlet Water Main Pipe* pada waktu 2411 jam, komponen *Outlet Water Main Pipe* pada waktu 3648 jam, komponen *Water Cooled Insulation Cover* pada waktu 4257 jam, dan komponen *Expansion Water Tank* pada waktu 2566 jam.
4. Berdasarkan hasil analisis biaya, strategi perawatan terbaik untuk komponen *Globe Valve PS*, *Strainer PS*, *Globe Valve SB*, *Strainer SB*, *SW Pump*, *FW Pump*, *Thermostatic Valve*, *Inlet Water Main Pipe*, *Outlet Water Main Pipe*, *Water Cooled Insulation Cover*, dan *Expansion Water Tank* adalah *preventive maintenance* karena dari segi biaya yang dikeluarkan lebih kecil dibandingkan *corrective maintenance*. Sedangkan strategi perawatan terbaik untuk komponen *FW Cooler* adalah *corrective maintenance* karena dari segi biaya yang

dikeluarkan lebih kecil dibandingkan
preventive maintenance.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. P. Nasution and A. Kartohardjono, "Pengerukan Pemeliharaan Alur Pelayaran Pelabuhan Pulau Baai Bengkulu dengan Sistim Sand By Passing," *Pros. Semnastek*, pp. 1–10, 2019.
- [2] F. R. Farmer, *Reliability Evaluation of Engineering Systems: Concepts and Techniques*, vol. 5, no. 1. 1983. doi: 10.1016/0143-8174(83)90020-3.
- [3] C. E. Ebeling, *An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering*. United States of America: McGraw-Hill Companies, Inc.
- [4] H. Widarto, "PENJADWALAN PERAWATAN SISTEM PENUNJANG DIESEL GENERATOR PADA CONTAINER CRANE DENGAN PEMODELAN DINAMIKA SISTEM : STUDI KASUS DI TERMINAL MULTIPURPOSE NILAM TIMUR PELABUHAN TANJUNG PERAK SURABAYA," 2015.
- [5] Z. Hameed, S. H. Ahn, and Y. M. Cho, "Practical aspects of a condition monitoring system for a wind turbine with emphasis on its design, system architecture, testing and installation," *Renew. Energy*, vol. 35, no. 5, pp. 879–894, 2010, doi: 10.1016/j.renene.2009.10.031.
- [6] V. J. Jimenez, N. Bouhmala, and A. H. Gausdal, "Developing a predictive maintenance model for vessel machinery," *J. Ocean Eng. Sci.*, vol. 5, no. 4, pp. 358–386, 2020, doi: 10.1016/j.joes.2020.03.003.
- [7] D. Smith, *J. RELIABILITY MAINTENABILITY AND RISK*, 8th ed. Butterworth-Heinemann: Elsevier, 2011.