

**TUGAS AKHIR  
(KS 1701)**

**"ANALISA MAINTENANCE COST  
PADA DIESEL GENERATOR KAPAL  
DI PT. PELAYARAN MERATUS  
DENGAN PENDEKATAN METODE MARKOV"**



PSSP  
623.272 36  
win  
a-  
2001

Oleh :

**AULIA WINDYANDARI**  
**NRP. 42 99 109 513**

**JURUSAN TEKNIK SISTEM PERKAPALAN  
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2001**

FOLIO NUMBER	
Tgl. Terima	03/01/02
Terima Dari	H
No. Agenda P.P.	21.4338

**"ANALISA MAINTENANCE COST  
PADA DIESEL GENERATOR KAPAL  
DI PT. PELAYARAN MERATUS  
DENGAN PENDEKATAN METODE MARKOV"**

**TUGAS AKHIR**

*Diajukan Guna Memenuhi Persyaratan  
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
Pada*

*Jurusan Teknik Sistem Perkapalan  
Fakultas Teknologi Kelautan  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya*

**Mengetahui / Menyetujui,**

**Dosen Pembimbing I,**

**Ir. Dwi Priyanta, MSE**  
**NIP. 132 085 805**



**Dosen Pembimbing II,**

**Lahar Baliwangi, ST, M.Eng**  
**NIP. 132 133 979**

*Muli Jasa*

## ***ABSTRAK***

*Diesel generator merupakan system auxiliary yang penting peranannya dalam pengoperasian kapal. Analisa terhadap sebuah merk diesel generator yang beroperasi dengan daya yang sama dan berada pada periode maintenance yang sama pada kapal Caraka Jaya Niaga III-17 dan Caraka Jaya Niaga III-24 milik PT. Pelayaran Meratus Surabaya dilakukan guna mengetahui model kegagalan komponennya. Time to Failure dipilih sebagai variable random untuk menentukan model kegagalan, sedangkan untuk estimasi parameter distribusi dipakai metode MLE (Maksimum Likelihood Estimation). Distribusi probabilitas yang dipakai adalah distribusi eksponensial karena mengacu pada usefull life period dalam bathtub diagram dan persyaratan yang harus dipenuhi oleh Metode Markov.*

*Pendekatan Metode Markov digunakan untuk analisa system yang mampu-rawat (repairable) dengan cara mempresentasikan semua laju kegagalan (failure rate) dan laju perbaikan (repair rate) yang mungkin terjadi ke dalam state space diagram.*

*Hasil dari analisa ini adalah perkiraan biaya perawatan (maintenance cost ) melalui pemodelannya dan nilai ketersediaan (availability) system.*

## KATA PENGANTAR

Puji syukur kami panjatkan kehadirat Allah SWT atas segala nikmat dan karuniaNya sehingga kami dapat menyelesaikan penulisan Tugas Akhir kami, sebagai syarat kelulusan tingkat sarjana strata satu Jurusan Teknik Sistem Perkapalan Fakultas Teknologi Kelautan Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Pada kesempatan ini kami mengucapkan terimakasih kepada semua pihak yang telah membantu selama kami menjalani masa perkuliahan khususnya dalam penyusunan tugas akhir ini, antara lain :

- Bapak Dr. Ir. A.A. Masroeri, MEng, selaku ketua jurusan Teknik Sistem Perkapalan FTK-ITS dan dosen wali semasa kami menjalani kuliah.
- Bapak Ir. Dwi Priyanta, MSE, sebagai Dosen Pembimbing Tugas Akhir yang telah memberikan ide, bimbingan dan inspirasi sampai selesaiya tugas akhir.
- Bapak Lahar Baliwangi, ST, MEng, sebagai Dosen Pembimbing Tugas Akhir, yang telah memberikan ide dan bimbingan untuk tugas akhir ini.
- Dosen dan Karyawan jurusan Teknik Sistem Perkapalan ITS-FTK.
- Idi Purnama Rambi, ST, sebagai Pembimbing lapangan di PT. Pelayaran Meratus Surabaya.
- Heru Trakindo, terimakasih atas referensinya
- Bapak dan Ibuk serta keluargaku, yang telah memberikan dorongan moral dan material sehingga masa kuliah dan tugas akhir ini dapat diselesaikan.

- Rekan-rekan LJ Eks. 1999 Teknik Sistem Perkapalan, terimakasih atas kekompakan dan kerjasamanya.
- Rekan-rekan seperjuangan di GW 9 dan GW 11, terimakasih atas dukungan dan bantuannya.
- Semua pihak yang tidak dapat kami sebutkan satu-persatu.

Kami menyadari sepenuhnya bahwa dalam penulisan Tugas Akhir ini masih terdapat kekurangan-kekurangan. Oleh karena itu kritik dan saran yang membangun dari berbagai pihak sangat kami harapkan.

Akhir kata semoga Tugas Akhir ini bermanfaat bagi pembaca dan perkembangan teknologi.

Surabaya, Agustus 2001

Penyusun

## DAFTAR ISI

Halaman Judul	i
Lembar Pengesahan	ii
Abstrak	iii
Kata Pengantar	iv
Daftar Isi	v
Daftar Gambar	xi
Daftar Tabel	xii
Daftar Lampiran	xiii
BAB I PENDAHULUAN	I - 1
1.1. Latar Belakang	I - 1
1.2. Perumusan Masalah	I - 2
1.3. Tujuan	I - 4
1.4. Manfaat	I - 4
BAB II DASAR TEORI	
2.1. Konsep Keandalan	II - 1
2.1.1. Perawatan Berbasis Keandalan	II - 2
2.1.2. Pemodelan System	II - 3
2.1.2.1. Series System	II - 3

2.1.2.2. Pararel System	II – 4
2.1.2.3. Series-Pararel System	II – 5
2.1.2.4. Partially Redundant System	II – 6
2.1.2.5. Partially Redundant System	II – 6
2.2. Proses Stokastik	II – 7
2.3. Model Kegagalan (Failure Modelling)	II – 8
2.3.1. Penentuan Variabel Random	II - 8
2.3.2. Cumulatif Distribusi Function dan Probability	
Density Function	II – 9
2.3.3. Fungsi Keandalan (Reliability)	II – 10
2.3.4. Laju Kegagalan (Failure Rate)	II – 11
2.3.5. Kurva Bath-up	II – 11
2.3.6. Maximum Likelihood Estimation (mle)	II - 13
2.4. Distribusi Probabilitas	II – 13
2.4.1. Distribusi Eksponensial	II – 14
2.4.2. Distribusi Waktu Maintenance/Repair	II – 14
2.5. Proses Markov	II – 15
2.5.1. Proses Markov Kontinyu	II – 16
2.5.2. Konsep Umum Pemodelan	II – 17
2.5.2.1. Konsep laju perpindahan (Trasition Rate)	II – 17
2.5.2.2. Pengevaluasian Probabilitas yang tergantung waktu	II – 18

2.5.2.3. Pengevaluasian probabilitas untuk kondisi batas	II – 19
2.5.3. Diagram Ruang Keadaan (State space diagram)	
2.5.3.1. Pemodelan komponen tunggal yang mampu-rawat	II – 20
2.5.3.2. Pemodelan dua komponen yang mampu-rawat	II – 20
2.5.3.3. Pemodelan lebih dari dua komponen yang mampu-rawat	II – 21
2.5.4. Stochastic Transitional Probability (STP) Matrix untuk Continous Markov	II – 22
2.5.5. Evaluasi Limiting State Probability	
2.6. Kemampu-rawatan (Maintainability) dan Ketersediaan (Availability)	II – 23
2.6.1. Kemampu-rawatan (Maintainability)	II – 24
2.6.1.1. Ekonomi dari Reparasi dan Perawatan	II – 25
2.6.2. Ketersediaan (Availability)	
<b>BAB III METODE PENELITIAN</b>	<b>III – 1</b>
3.1. Pengumpulan Data	III – 4
3.2. Identifikasi dan Kecukupan Data	III – 4
3.3. Model Kegagalan	III – 4

3.4. Pemodelan Markov	III – 5
3.5. Analisa Maintenance Cost dan Availability System	III – 6
3.5.1. Perhitungan Maintenance Cost	III – 6
3.5.2. Perhitungan Availability	III - 6
3.6. Kesimpulan	III – 7
 BAB IV ANALISA DATA	IV – 1
4.1. Deskripsi Obyek Penelitian	IV – 2
4.1.1. Sistem – sistem dalam Diesel Generator	IV - 3
4.1.2. Proses Sensor Data	IV – 11
4.2. Pengolahan Data	IV - 12
4.2.1. Perhitungan Laju Kegagalan System	IV - 14
4.2.2. Model Kegagalan Komponen	IV - 16
4.2.2.1. Fuel Oil Filter	IV - 17
4.2.2.2. Nozzle Injector Bahan Bakar	IV - 18
4.2.2.3. Lubricating Oil Filter	IV - 20
4.2.2.4. Lubricating Oil Carter	IV - 22
4.2.2.5. Fresh Water Cooler	IV - 23
4.2.2.6. Lubricating Oil Cooler	IV - 25
4.2.2.7. Intercooler	IV - 27
4.2.2.8. Pipa Pendingin Sea Water	IV - 28
4.2.2.9. Turbocharger	IV – 30

4.3. Pemodelan Markov	IV - 32
4.3.1. Reliability Blok Diagram System	IV - 32
4.3.2. Pengkonstruksian State Space Diagram	IV - 34
4.3.3. Stochastic Transitional Probability (STP) Matrix	IV - 36
4.3.4. Perhitungan Availability Diesel Generator	IV – 36
4.4. Pemodelan Maintenance Cost	IV - 37
4.4.1. Pemodelan untuk ‘One Engine System’	IV - 38
4.4.2. Perhitungan Maintenance Cost	IV – 41
4.5. Diskusi	IV – 43
 BAB V     KESIMPULAN DAN SARAN	IV – 1
5.1. Kesimpulan	IV– 1
5.2. Saran – saran	IV – 2

## DAFTAR GAMBAR

Gamabar	2.1	Variabel State dan Waktu Kegagalan Komponen	II - 9
	2.2	Kurva Bath-up	II - 10
	2.3	State Space Diagram untuk Komponen Tunggal	II - 17
	2.4	State Space Diagram Komponen Tunggal mampu rawat dengan tiga keadaan	II - 20
	2.5	State Space Diagram dua Komponen berbeda yang mampu-rawat	II - 21
	3.1	Alur Metode Penelitian	III - 3
	4.1	Skema Sistem Baha Bakar Diesel Generator	IV - 4
	4.2	Skema Sistem Pelumasan Diesel Generator	IV - 6
	4.3	Skema Sistem Pendingin Diesel Generator	IV - 8
	4.4	Skema Turbocharger Diesel Generator	IV - 10
	4.5	Skema Diesel Generator	IV - 33

## **DAFTAR TABEL**

Tabel	4.1	Rata-rata Laju Kegagalan Komponen per hari	IV - 13
	4.2	Laju Kegagalan Komponen per hours	IV – 15
	4.3	Laju Kegagalan System pada Diesel Generator	IV - 15
	4.4	Hasil Wawancara Frekuensi Perbaikan (Repair) Sistem per tahun	IV - 35
	4.5	Hasil Perhitungan Repair Rate Sistem	IV - 35

## **DAFTAR LAMPIRAN**

Lampiran	A	General Description Object Penelitian dan Spesifikasi Diesel Generator	A - 1
	B	Data Time to Failure Komponen dan Pengelompokan Sistem	B - 1
	C	Hasil Plotting TTF Komponen dengan Software Weibull ++	C - 1
	D	State Space Diagram	D - 1
	E	Matrix Limiting State Probability dan Hasil Perhitungan dengan Software Matlab	E - 1

**BAB I**  
**PENDAHULUAN**

*Multi Jasa*

## BAB I

### PENDAHULUAN

#### 1.1. Latar Belakang

Kemajuan industri bidang kelautan menuntut berkembangnya sarana transportasi laut yang digunakan. Salah satu alat transportasi yang umum dipakai adalah kapal. Dari tahun ke tahun semakin banyak kapal yang beroperasi di Indonesia. Hal ini menyebabkan persaingan yang semakin ketat antara perusahaan pemilik kapal. Mereka berlomba-lomba meningkatkan kualitas kapal yang dimiliki terutama pada saat kapal sedang beroperasi. Usaha yang dilakukan antara lain dengan cara mengadakan perubahan-perubahan pada system desain, sub system dan komponennya. Perubahan inilah yang menjadikan system engineering semakin kompleks. Suatu system yang kompleks mempunyai susunan komponen-komponen yang kompleks juga, sehingga besar sekali kemungkinan terjadinya kegagalan pada komponen. Kegagalan pada komponen mengakibatkan system tidak dapat beroperasi dengan baik. Untuk mejaga kelancaran system beroperasi sesuai dengan fungsinya, harus dilakukan usaha untuk memperkecil laju kegagalan system. Salah satunya yaitu dengan cara perawatan dan repair. Strategi perawatan system yang baik akan memperkecil frekuensi repair system dan otomatis memperkecil biaya perawatan. Strategi perawatan berbasis keandalan merupakan strategi perawatan yang cukup menjamin kelancaran kerja system.

Suatu system dapat menjalankan fungsinya dengan baik dan benar apabila system mempunyai tingkat keandalan yang tinggi. Bermacam-macam teknik analisa telah digunakan untuk mengetahui tingkat keandalan suatu system. Salah satunya adalah metode pendekatan Markov. Metode ini ini digunakan untuk analisa system yang mampu- rawat (repairable). Untuk mengetahui bahwa suatu system dikatakan repairable yaitu dengan cara melakukan analisa laju kegagalan (failure rate) yang terjadi pada komponennya. Apabila system/komponen menunjukkan probabilitas distribusi dengan laju kegagalan yang konstan (biasanya distribusi eksponensial atau distribusi poisson), maka system bisa dikatakan repairable. Sedangkan syarat system dapat dianalisa dengan pendekatan Markov selanjutnya adalah system harus mempunyai lack memory dan proses dari sistem harus stasioner dan homogen.

Pada tugas akhir ini analisa dilakukan pada sebuah diesel generator kapal (auxiliary engine) yang sudah beroperasi selama 4 tahun.

Hasil dari analisa ini adalah perkiraan biaya perawatan dan ketersediaan system, serta mengetahui komponen-komponen diesel generator yang sudah memasuki periode wear-out. Sehingga melalui perkiraan biaya perawatan dapat ditentukan strategi perawatan yang lebih baik.

## 1.2. Perumusan Masalah

PT. Pelayaran Meratus adalah sebuah perusahaan pelayaran yang sudah mengoperasikan kapal-kapalnya dalam jumlah banyak. Sebagai sarana trasportasi yang vital bagi kelangsungan usahanya , kelancaran dan keamanan pengoperasian

system di kapal harus benar-benar diperhatikan, termasuk system auxiliary enginanya (generator diesel). Kapal yang sudah beroperasi lebih dari 15 tahun, mempunyai auxiliary engine yang tergolong sudah tua dan suatu saat perlu di re-power (diganti). Kendala yang dihadapi disini adalah perusahaan kadang tetap saja memakai auxiliary engine yang sudah harus di re-power karena mereka tidak mengetahui bahwa auxiliary engine itu sudah memasuki periode wear-out dan selalu menganggap auxiliary enginanya masih bisa dipakai, sehingga sering terjadi kagagalan pada saat system beroperasi dan mengakibatkan frekuensi repair system bertambah dan maintenance costnya-pun bertambah besar.

Periode wear-out dan usefull suatu auxiliary engine dapat diketahui pada bathup diagram melalui analisa laju kegagalan komponennya berdasarkan distribusi kegagalan yang ditunjukkan oleh komponen. Komponen yang masuk dalam periode wear-out harus diganti dengan yang baru, sebab kalau komponen tersebut tetap saja digunakan, kegagalan – kegagalan yang terjadi akan bertambah parah. Sedangkan untuk komponen yang masih dalam periode usefull komponen (repairable) dilakukan evaluasi dengan pendekatan metode Markov melalui pembuatan model state – space diagram system.

Pembuktian dengan pendekatan metode Markov menghasilkan perkiraan maintenance cost (biaya perawatan) yang dikeluarkan dan dapat juga diketahui nilai ketersediaan (availability) system. Sehingga dapat dipakai sebagai pedoman untuk menentukan strategi maintenance yang lebih baik dan availability system tetap terjaga.

### 1.3. Tujuan

Tugas akhir ini bertujuan untuk menerapkan salah satu konsep teknik analisa reliability, yaitu failure rate analysis (analisa laju kegagalan) dan pendekatan metode Markov.

### 1.4. Manfaat

Manfaat tugas akhir ini adalah untuk mengetahui biaya maintenance yang dikeluarkan oleh perusahaan melalui pemodelan perawatannya yang selanjutnya dapat dipakai sebagai pedoman untuk pemilihan strategi maintenance yang lebih baik.

**BAB II**  
**DASAR TEORI**

## BAB II

### DASAR TEORI

Pemecahan suatu masalah harus didasari oleh teori-teori yang relevan dan literatur pendukung untuk memperkuat keakuratan permasalahan yang ada dan juga untuk mendapatkan hasil analisa yang dapat dipertanggungjawabkan.

Pada bab ini akan diuraikan dasar-dasar teori yang akan digunakan untuk memecahkan masalah, antara lain pengenalan pada konsep keandalan, konsep perawatan berbasis keandalan, availability, proses stokastik, distribusi probabilitas, proses Markov dan teori pendukung lainnya.

#### 2.1. Konsep Keandalan

Keandalan (*Reliability*) merupakan probabilitas suatu alat (*device*) untuk dapat berfungsi sesuai dengan fungsi yang diinginkan selama jangka waktu tertentu yang telah ditetapkan (*Roger D. Leitch*). Definisi ini mengandung empat istilah penting, yaitu :

- a. Fungsi

Keandalan suatu komponen perlu dilihat dari seberapa besar komponen itu menjalankan fungsinya dengan baik (sesuai dengan prosedur yang telah ditentukan) dalam jangka waktu tertentu. Kegagalan fungsi dari komponen disebabkan oleh perawatan yang tidak terencana (*unplanned maintenance*).

b. Lingkungan

Kondisi operasi atau lingkungan sangat menentukan tingkat keadalan suatu komponen (peralatan). Lingkungan disini meliputi antara lain pemaketan, transportasi, instalasi, penyimpanan, ketersediaan alat-alat perawatan, debu, kimia, dan polutan lainnya.

c. Waktu

Keandalan menurun dengan waktu, waktu operasi meningkat sehingga probabilitas gagal lebih tinggi. Waktu operasi ini diukur tidak hanya dalam unit waktu tapi bisa dalam istilah jarak waktu.

d. Probabilitas

Keandalan diukur sebagai probabilitas yang berubah terhadap waktu dan termasuk dalam analisa statistik

### 2.1.1. Perawatan Berbasis Keandalan

Proses perawatan (maintenance) dapat dilaksanakan dengan baik apabila ukuran kuantitatif dari maintainability sistem diidentifikasi terlebih dahulu. Keandalan (reliability) merupakan salah satu alat kuantitatif yang diperlukan untuk memodelkan sistem, yang nantinya dipakai pada proses maintenance. Sehingga keandalan suatu sistem menentukan besarnya frekuensi maintenancenya. (*Benjamin S. Blanchard*). Semakin handal sistem, semakin kecil tindakan maintenance yang dilaksanakan dan biaya maintenancepun menjadi kecil juga.

### 2.1.2. Pemodelan System

Suatu sistem yang kompleks akan lebih mudah untuk dianalisa jika sistem tersebut dimodelkan ke dalam RBD (*Reliability Blok Diagram*) terlebih dahulu, karena sistem akan menjadi lebih sederhana. Pembuatan RBD (*Reliability Blok Diagram*) dapat dikategorikan menjadi beberapa item, antara lain *series system*, *pararel system*, *series pararel system*, *partially redundant system*, *standby redundant system*. Standby redundant system dibagi lagi yaitu perfect switching dan imperfect switching (*Roy Billington & Ronald N. Alan*). Pembagian ini tergantung dari asumsi kerja sistem itu sendiri.

#### 2.1.2.1. Series System

Series system, gb. 2.1 merupakan suatu sistem yang bekerja apabila komponen A dan B harus sukses dan apabila salah satu komponen tersebut gagal maka sistem tersebut akan gagal, dengan kata lain komponen sistem tidak bisa saling mengantikan.



Gambar 2.1

*Reliability Blok Diagram Series System*

Series system diformulasikan sebagai berikut :

$$R_s = R_A \cdot R_B \quad (2.1)$$

$$Q_s = Q_A + Q_B - Q_A \cdot Q_B \quad (2.2)$$

Jika terdapat n komponen dalam series maka persamaan (2.1) dan (2.2) menjadi :

$$R_s = \prod_{i=1}^n R_i \quad (2.3)$$

$$Q_s = 1 - \prod_{i=1}^n R_i \quad (2.4)$$

Dimana :  $R_s$  = reliability series system

$Q_s$  = kegagalan series system

$R_A$  = reliability komponen A

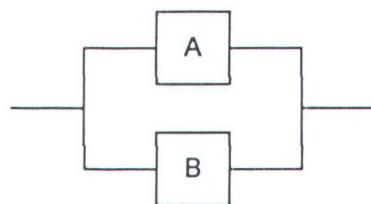
$R_B$  = reliability komponen B

$Q_A$  = kegagalan komponen A

$Q_B$  = kegagalan komponen B

### 2.1.2.2. Pararel System

Pararel system (gb. 2.2) merupakan sistem yang akan bekerja dengan sukses apabila salah satu dari komponen tersebut bekerja dengan sukses (komponen A atau komponen B saja) atau komponen sistem dapat saling menggantikan.



Gambar 2.2  
Reliability Blok Diagram Pararel System

Pararel system dapat diformulasikan sebagai berikut :

$$R_p = R_A + R_B - R_A \cdot R_B \quad (2.5)$$

$$Q_p = Q_A \cdot Q_B \quad (2.6)$$

Dimana : Rp = reliability pararel system

Qp = kegagalan pararel system

R<sub>A</sub> = reliability komponen A

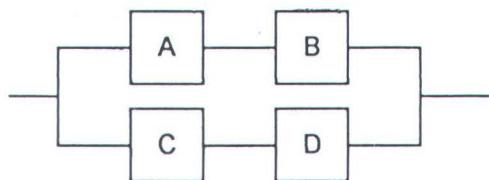
R<sub>B</sub> = reliability komponen B

Q<sub>A</sub> = kegagalan komponen A

Q<sub>B</sub> = kegagalan komponen B

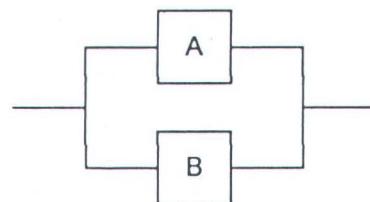
### 2.1.2.3. Series – Pararel System

Series – pararel system (gb. 2.3) merupakan suatu sistem yang berupa gabungan antara seri dan pararel.



Gambar 2.3

Reliability Blok Diagram Series – Pararel System

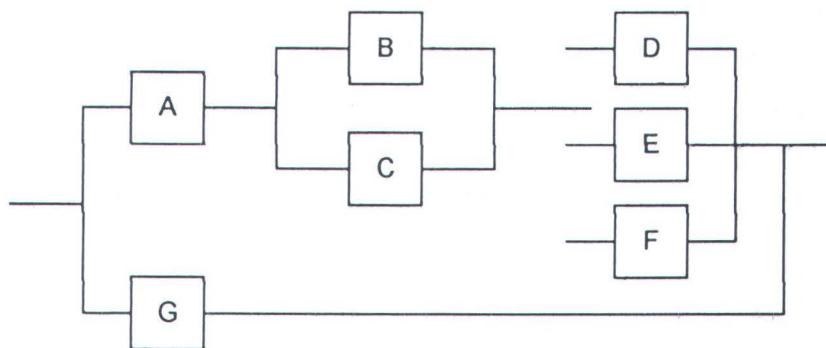


Gambar 2.4

Reliability Blok Diagram Pararel System

Penyelesaian sistem seperti ini terlihat jelas pada gambar 2.3 dan 2.4, pertama disederhanakan dulu komponen yang diseri (A dan B, C dan D) kemudian menghasilkan gambar 2.4. Gambar 2.4 ini dievaluasi keandalannya dengan rumus pararel.

#### 2.1.2.4. Partially Redundant System



*Gambar 2.5  
Reliability Blok Diagram Partially Redundant System*

*Partially Redundant System* pada sistem ini (gb. 2.5) adalah pada komponen D, E, F yang dipararel dengan pengkodean 2/3 yang artinya sistem ini akan sukses apabila minimal terdapat 2 diantara 3 komponen tersebut bekerja dengan baik.

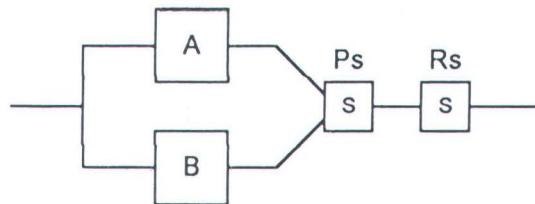
#### 2.1.2.5. Standby Redundant System

Standby redundant system dibagi menjadi dua yaitu perfect switching dan imperfect switching.

- Perfect Switching

Pemodelan dan evaluasi keandalan dari perfect switching sama dengan pararel-system.

b. Imperfect Switching



Gambar 2.6

*Reliability Blok Diagram Imperfect Switching*

$Ps$  merupakan kemungkinan (probabilitas) sukses dari switch dan  $Rs$  merupakan reliability dari switch, dari sini dapat dibuat formula sebagai berikut :

$$Q = [Q_A - Q_A \cdot P_S(1 - Q_B)] + Q_S - [Q_A - Q_B \cdot P_S(1 - Q_B)]Q_S \quad \text{atau} \quad (2.7)$$

$$R = R_S [1 - Q_S (Q_A - Q_B \cdot P_S(1 - Q_B))] \quad (2.8)$$

## 2.2. Proses Stokastik

Pada kehidupan nyata, sejumlah fenomena dapat dipikirkan sebagai percobaan yang mencakup sederetan pengamatan yang berturut-turut dan bukan satu kali pengamatan. Umumnya tiap pengamatan dalam suatu percobaan tergantung pada beberapa atau semua pengamatan masa lalu dan hasil tiap pengamatan, pada umumnya ditentukan dengan hukum-hukum peluang. Studi tentang percobaan dalam bentuk seperti ini dikenal dengan teori proses stokastik.

Misalnya terdapat suatu karakteristik sebuah sistem yang diamati dalam titik waktu diskrit (ditandai dengan  $0, 1, 2, \dots$ ), dan misalkan  $X(t)$  adalah

karakteristik sistem tersebut dalam waktu  $t$ , maka nilai  $X(t)$  tidak diketahui secara pasti sebelum waktu  $t$ , dan oleh karena itu  $X(t)$  dipandang sebagai variabel acak  $X(0), X(1), X(2), \dots$  dikenal sebagai proses stokastik dengan waktu diskrit.

Secara umum proses stokastik dapat dinyatakan sebagai :

$$\{X(t), t \in T\} \quad (2.9)$$

dimana untuk setiap  $t \in T$ ,  $X(t)$  adalah variabel acak. Dengan memperhatikan variabel diatas, dapat dikatakan bahwa proses stokastik adalah himpunan variabel acak yang diindekskan terhadap  $t$ , dan model stokastik adalah model matematis yang probabilistik dan dinamis. Dalam proses stokastik nilai dari variabel acak disebut sebagai state proses. Parameter waktu proses stokastik adalah  $t$ . Daerah atau ruang state disebut sebagai state space ( $I$ ), yaitu himpunan state yang mungkin dari suatu proses stokastik, sedang  $T$  adalah ruang untuk  $t$  yang mungkin. Berdasarkan tipe state dan tipe parameternya, proses stokastik dapat dibedakan menjadi empat macam :

1. Proses stokastik dengan state diskrit dan parameter diskrit
2. Proses stokastik dengan state diskrit dan parameter kontinyu
3. Proses stokastik dengan state kontinyu dan parameter diskrit
4. Proses stokastik dengan state kontinyu dan parameter kontinyu

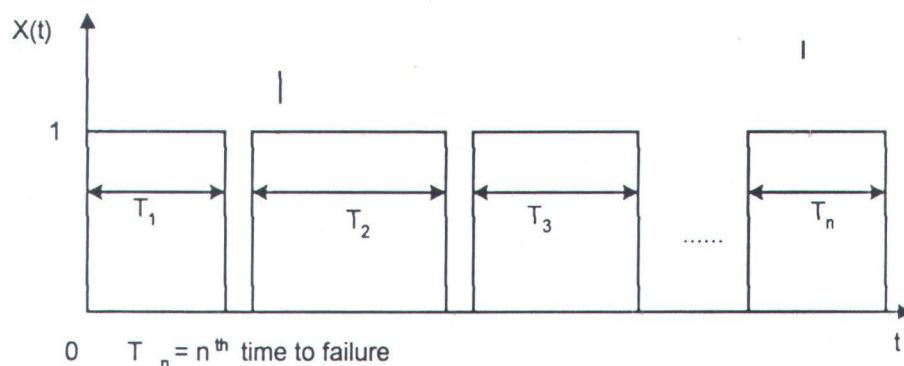
### 2.3. Model Kegagalan (*Failure Modelling*)

#### 2.3.1. Penentuan variabel random

Penentuan variabel random diperlukan untuk menunjukkan model kegagalan dari suatu sistem. Biasanya yang dipilih sebagai variabel random

adalah waktu kegagalan (*time to failure*) komponen, yang disimbolkan T. Time to failure (TTF) didefinisikan sebagai waktu yang dilalui komponen saat mulai beroperasi sampai mangalami kegagalan. Model kegagalan diperoleh dari TTF komponen yang dianalisa, yang dikelompokkan secara seri. TTF dari komponen mengikuti beberapa distribusi yang kita kenal seperti distribusi eksponensial, poisson, weibull dan sebagainya.

Gambar 2.7. dibawah ini menunjukkan hubungan antara state variabel  $X(t)$  dan waktu kegagalan T.



*Gambar 2.7  
Variabel state dan waktu kegagalan komponen*

Dimana :  $X(t)$  = variabel state yang menunjukkan keadaan komponen pada saat t

$X(t) = 1$ , jika komponen berfungsi pada saat t

$X(t) = 0$ , jika komponen gagal pada saat t

### 2.3.2. Cumulatif distribusi function dan probability density function

Konsep yang berkaitan dengan distribusi probabilitas yang diperlukan dalam mengevaluasi keandalan dari sistem rekayasa yang berbasis pada waktu

adalah cdf dan pdf. Jika diasumsikan bahwa TTF-nya merupakan distribusi kontinyu pdf.  $F(T)$  maka probabilitas komponen gagal dalam interval waktu  $(0,t]$  diekspresikan dalam persamaan berikut :

$$F(t) = P(T \leq t) = \int_0^t f(\zeta) d\zeta \quad (2.10a)$$

dimana :  $F(t)$  = cumulatif distribution function (cdf) dari variabel random T  
Sedangkan probability density function (pdf) dari variabel random T dapat diperoleh dari deferensial pers. (2.10a) dengan bertambahnya t.

$$\begin{aligned} f(t) &= \frac{d}{dt} F(t) \\ &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{\Delta t} \\ &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(t < T \leq t + \Delta t)}{\Delta t} \end{aligned} \quad (2.10b)$$

dimana :  $f(t)$  = probability density function (pdf) dari variabel random T

### 2.3.3. Fungsi Keandalan (*Reliability*)

Fungsi reliability  $R(t)$  yang menunjukkan probabilitas komponen tidak mengalami kegagalan dalam interval  $(0,t]$  ditulis sebagai berikut :

$$R(t) = 1 - F(t) = P(T > t) = \int_t^\infty f(\zeta) d\zeta \quad (2.11)$$

Persamaan diatas juga disebut fungsi unreliabilitynya disimbolkan  $Q(t)$ .

### 2.3.4. Laju Kegagalan (*Failure Rate*)

Probabilitas sebuah komponen akan gagal dalam interval  $(t + \Delta t]$ , pada saat komponen dioperasikan dalam waktu  $t$ , diberikan dalam persamaan :

$$\begin{aligned} P(t < T \leq t + \Delta t | T > t) &= \frac{P(t < T \leq t + \Delta t)}{P(T > t)} \\ &= \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{R(t)} \end{aligned} \quad (2.12)$$

Laju kegagalan,  $z(t)$ , dari komponen bisa diperoleh dengan membagi persamaan (2.12) dengan panjang interval waktu  $\Delta t$  dan  $\Delta t \rightarrow 0$

$$\begin{aligned} z(t) &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(t < T \leq t + \Delta t | T > t)}{\Delta t} \\ &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{\Delta t} \bullet \frac{1}{R(t)} \\ &= \frac{f(t)}{R(t)} \end{aligned} \quad (2.13)$$

### 2.3.5. Kurva Bath-up

Kurva bathup menggambarkan perlakuan qualitatif dari fungsi kegagalan. Kurva ini menunjukkan bahwa komponen yang beroperasi dalam suatu sistem, suatu waktu pasti akan gagal sampai akhirnya perlu adanya penggantian komponen. Kurva bathup dibagi ke dalam 3 daerah karakteristik, yaitu :

- a. Daerah burn-in period

Daerah yang ditunjukkan dengan trend semakin turunnya kegagalan komponen berdasarkan fungsi waktu atau umur, artinya pada

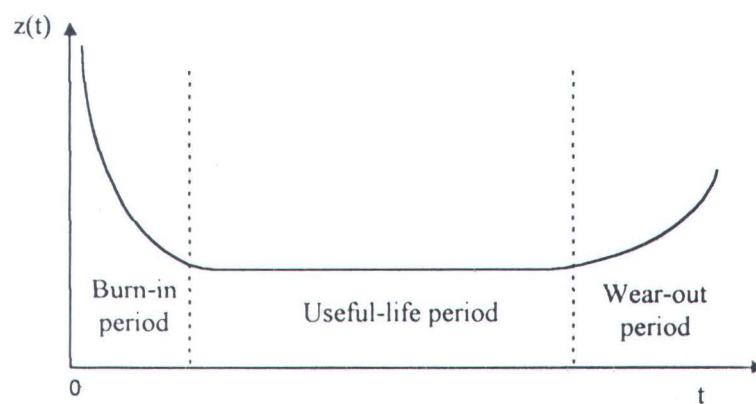
kenyataannya tidak ditemukan kerusakan pada komponen dengan kata lain komponen masih baru dioperasikan.

b. Daerah useful-life period

Daerah yang ditunjukkan dengan trend laju kegagalan yang konstan, artinya pada kenyataannya kegagalan yang terjadi pada komponen peluangnya tetap. Komponen yang berada di daerah ini tergolong komponen yang mampu-rawat (*repairable komponen*)

c. Daerah wear-period

Daerah yang ditunjukkan dengan trend bertambahnya laju kegagalan komponen secara tiba-tiba seiring dengan waktu, artinya komponen yang masuk periode ini sudah tidak layak pakai dan harus diadakan penggantian.



Gambar 2.8  
Kurva Bath-up

### 2.3.6. Maximum Likelihood Estimate (mle)

Maximum likelihood estimate (mle) merupakan metode yang digunakan untuk mendapatkan parameter dari beberapa distribusi probabilitas dari suatu variabel random.

Suatu data independent sebanyak n, misalkan  $T_1, T_2, \dots, T_n$ , dan data merupakan sampel random dari sebuah distribusi dengan  $pdf f(t, \theta)$ , dimana  $\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n)$  adalah vektor dari parameter yang belum diketahui. Maka persamaan likelihood untuk  $\theta$  adalah :

$$L(\theta) = f(t_1, \theta)f(t_2, \theta)\dots f(t_n, \theta) \quad (2.14)$$

Untuk mendapatkan nilai estimator dari  $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$  yang menyatakan fungsi likelihood berdasarkan nilai  $T_1, T_2, \dots, T_n$ , digunakan persamaan logaritma natural maximum dari fungsi likelihood agar mudah diselesaikan. Secara umum kondisi yang dibutuhkan untuk mendapatkan MLE adalah dengan mengambil derivatif parsial pertama dari logaritma fungsi likelihood berdasarkan  $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$  dan membuat persamaan likelihood = 0

$$U_i(\theta) = \frac{\partial \log(\theta)}{\partial \theta_i} = 0 \quad (2.15)$$

## 2.4. Distribusi Probabilitas

Beberapa distribusi probabilitas digunakan untuk menunjukkan distribusi dari data TTF. Distribusi probabilitas yang dipilih untuk memodelkan kegagalan diesel generator ini adalah distribusi eksponensial dan distribusi waktu maintenance/repair.

### 2.4.1. Distribusi Eksponensial

Distribusi eksponensial umumnya digunakan untuk mendeskripsikan laju kegagalan yang konstan dari sebuah sistem. Jika time to failure t dari komponen distribusi eksponensial dengan parameter  $\lambda$  dan  $\gamma$  maka pdf dari T adalah :

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda(t-\gamma)} \quad (2.16)$$

dimana :  $\lambda$  = failure rate

$\gamma$  = shape parameter

Fungsi reliability distribusi eksponensialnya menjadi :

$$R(t) = e^{-\lambda(t-\gamma)} \quad (2.17)$$

Dimana fungsi laju kegagalan dari distribusi eksponensial adalah :

$$Z(t) = \lambda \quad (2.18)$$

Persamaan (2.16) merupakan distribusi eksponensial dengan dua parameter.

Untuk distribusi eksponensial dengan satu parameter maka  $\gamma = 0$ .

### 2.4.2. Distribusi Waktu Maintenance/Repair

Jika  $m(t)$  adalah pdf repair time,  $M(t)$  adalah maintainability, maka probabilitas komponen diperbaiki dalam waktu t dan  $M(t)$  adalah fungsi kumulatif, maka :

$$M(t) = \int_0^t m(\tau) d\tau \quad (2.19)$$

Dan repair rate  $\mu$  dirumuskan oleh :

$$\mu(t) = \frac{m(t)}{1 - M(t)} \quad (2.20)$$

Repair atau maintenance rate mempunyai kesamaan dengan failure rate,  $\lambda$  sehingga probabilitas,  $P$  suatu komponen berada dalam state kegagalan pada waktu  $t$  diubah ke fungsi state oleh waktu  $t + \delta t$  dengan formula :

$$P = \mu(t)dt \quad (2.21)$$

Yang mana konsep ini nantinya dipakai dalam pemodelan Markov.

## 2.5. Proses Markov

Analisa Markov adalah suatu metode yang mempelajari sifat-sifat suatu variabel pada masa sekarang yang didasarkan pada sifat-sifatnya di masa lalu dalam usaha menaksir sifat-sifat variabel yang sama di masa mendatang.

Teknik pemodelan Markov menawarkan suatu pemodelan untuk memperhitungkan waktu repair atau *repairable system*. Aplikasi Markov merupakan perilaku random sistem yang bervariasi secara kontinyu maupun diskrit terhadap ruang dan waktu, atau disebut proses stokastik.

Adapun syarat agar sistem memakai pemodelan Markov adalah :

- a. Sistem memiliki *lack memory*, artinya keadaan sistem di masa akan datang tidak tergantung dari keadaan masa lalu kecuali keadaan yang langsung mendahuluinya. Dengan kata lain keadaan sistem di masa akan datang hanya tergantung keadaan saat ini bukan masa lalu dan juga tidak tergantung bagaimana suatu sistem dapat mencapai suatu keadaan pada saat ini.
- b. Sistem harus homogen dan stasioner, artinya bahwa perilaku sistem adalah sama pada semua titik waktu yang akan dipertimbangkan, maksudnya

probabilitas untuk berpindah dari suatu keadaan ke keadaan lain adalah sama (stasioner) pada sembarang waktu baik waktu lampau dan waktu yang akan datang. Jika probabilitas ini merupakan fungsi dari waktu atau berupa angka diskrit yang berjenjang, maka proses ini dikategorikan sebagai non stasioner (non Markovian).

Kedua sifat tersebut diatas dimiliki sistem apabila sistem atau komponen yang ada dalam sistem memiliki distribusi probabilitas dengan laju kegagalan (*failure rate*) yang konstan. Fungsi distribusi probabilitas yang mempunyai laju kegagalan konstan misalnya distribusi eksponensial atau distribusi Poisson.

Secara umum pemodelan dengan pendekatan Markov dapat dipakai untuk memodelkan ruang dan waktu sistem baik yang diskrit maupun kontinyu. Umumnya space dari sistem adalah diskrit karena space ini hanya menunjukkan keadaan dari suatu sistem. Sebagai contoh suatu sistem mungkin dalam keadaan *up* atau *down*. Sedang waktu mungkin bisa diskrit atau kontinyu.

Pemodelan sistem disebut dengan rantai Markov diskrit (*discrete markov chain*) bila melibatkan pendekatan Markov secara diskrit. Bila pendekatan Markov secara kontinyu disebut rantai Markov kontinyu (*continuous markov chain*). Sesuai dengan keadaan sistem, maka pemecahan masalah yang dipakai dalam tugas akhir ini menggunakan proses Markov kontinyu.

### 2.5.1. Proses Markov Kontinyu

Teknik evaluasi dengan proses Markov kontinyu ini akan menyinggung pada sistem yang dapat dideskripsikan sebagai proses Markov stasioner, yaitu

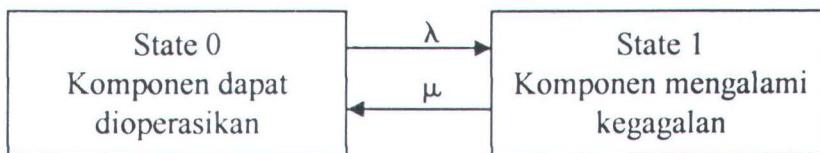
probabilitas kondisional atau reparasi selama interval waktu yang tertentu adalah konstan. Hal ini mengimplikasikan bahwa karakteristik kegagalan dan reparasi dari komponen berhubungan dengan distribusi eksponensial.

Jika kondisi yang diisyaratkan seperti diatas terpenuhi, maka pendekatan Markov dapat dipakai untuk berbagai permasalahan reliability, termasuk sistem yang repairable atau non-repairable.

### 2.5.2. Konsep Umum Pemodelan

#### 2.5.2.1. Konsep laju perpindahan (*transition rate*)

Untuk memahami konsep ini, sebagai contoh awal pemodelan pertimbangkan sebuah komponen tunggal yang mampu – reparasi (*repairable*), dimana failure rate komponen adalah konstan, yaitu keduanya dikarakteristikkan oleh distribusi eksponensial. Gambar dibawah ini menunjukkan state space diagram dari sebuah komponen tunggal.



Gambar 2.9

*State space diagram untuk komponen tunggal*

Definisi berikut ini merupakan penjelasan diagram diatas :

$P_0(t)$  = Probabilitas komponen dapat beroperasi pada saat t

$P_1(t)$  = Probabilitas komponen tidak dapat beroperasi pada saat t

$\lambda$  = laju kegagalan (*failure rate*)

$\mu$  = laju perbaikan (*repair rate*)

Failure density function bagi sebuah komponen yang memiliki laju kegagalan konstan,  $\lambda$ , dapat dituliskan sebagai :

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (2.22)$$

Dengan memanfaatkan persamaan (2.22), maka density function diagram state-space pada gambar 2.9, density function yang mewakili keadaan sistem pada saat beroperasi dan pada saat dalam keadaan gagal masing-masing dapat dituliskan sebagai :

$$f_0(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (2.23)$$

$$f_1(t) = \mu e^{-\mu t} \quad (2.24)$$

Parameter-parameter  $\lambda$  dan  $\mu$  menunjukkan laju transisi (*transition rate*) karena masing-masing menyatakan dimana sistem berpindah dari suatu keadaan ke keadaan yang lain.

### 2.5.2.2. Pengevaluasian probabilitas yang tergantung waktu

Untuk kasus continuous Markov proses perpindahan dari satu keadaan ke keadaan lain dinyatakan dengan laju perpindahan (*transition rate*), yaitu dengan parameter  $\lambda$  dan  $\mu$ . Probabilitas bahwa komponen tersebut tetap berada dalam keadaan beroperasi (state 0) pada saat  $(t + dt)$  dapat dinyatakan sebagai :

[Probabilitas untuk tetap beroperasi pada saat t DAN tidak mengalami kegagalan pada saat dt] + [Probabilitas untuk mengalami kegagalan pada saat t DAN akan dapat direparasi pada saat dt]. Secara matematis, ditulis :

$$Po(t+dt) = Po(t)(1 - \lambda dt) + Pl(t)(\mu dt) \quad (2.25)$$

### 2.5.2.3. Pengevaluasian probabilitas untuk kondisi batas

Probabilitas batas keadaan (*limiting state probability*) atau probabilitas untuk kondisi mantap (*steady-state probability*) tidak akan sama dengan nol untuk sebuah continuous Markov proses dimana sistemnya adalah ergodik.

Jika nilai probabilitas kondisi batas didefinisikan oleh  $P_0$  dan  $P_1$  masing-masing untuk keadaan beroperasi dan keadaan gagal, maka persamaan menjadi :

$$P_0 = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \quad \text{dan} \quad P_1 = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \quad (2.26)$$

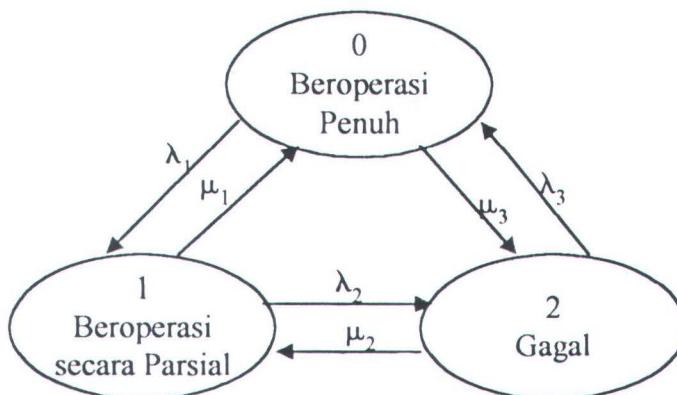
Ekspresi probabilitas batas keadaan dapat diterapkan tanpa memandang apakah sistem berawal dari keadaan beroperasi atau berawal dari keadaan gagal.

### 2.5.3. Diagram Ruang Keadaan (*State space diagram*)

Pengkonstruksian state space yang layak dengan memasukkan berbagai laju perubahan (*transition rate*) yang relevan diperlukan untuk penyelesaian proses continuous Markov, karena hal ini merupakan bagian terpenting dari seluruh rangkaian penyelesaian masalah Markov.

### 2.5.3.1. Pemodelan komponen tunggal yang mampu-rawat

Sebuah komponen yang mampu-rawat dapat memiliki lebih dari satu state space diagram yang menggambarkan pemodelan keadaan komponen tersebut beroperasi. Sebagai contoh, sebuah komponen dapat dimodelkan ke dalam sebuah state space diagram hanya dengan dua keadaan saja yaitu keadaan beroperasi dan keadaan gagal atau dengan tiga keadaan, yaitu keadaan beroperasi penuh, beroperasi secara parsial dan keadaan gagal. Gambar 2.10 merupakan contoh komponen tunggal mampu-rawat yang dimodelkan dalam tiga keadaan.



Gambar 2.10

State space diagram komponen tunggal mampu-rawat dengan tiga keadaan

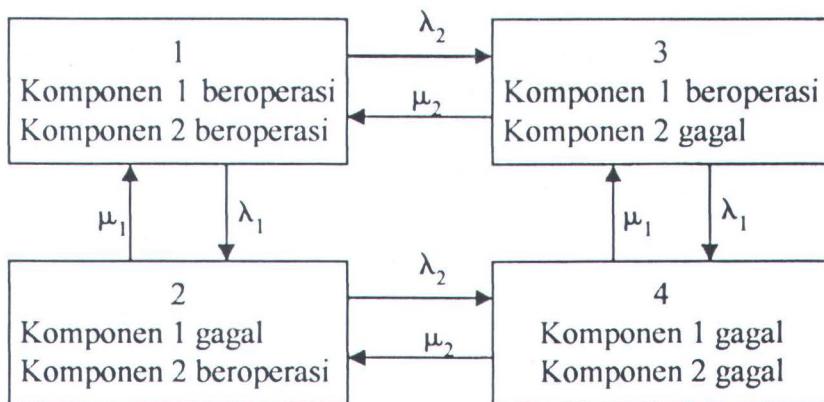
### 2.5.3.2. Pemodelan dua komponen yang mampu-rawat

Sebuah sistem yang terdiri dari dua komponen berbeda yang mampu-rawat akan memiliki minimal empat buah kemungkinan keadaan. Keempat keadaan yang mungkin adalah :

- kedua komponen dapat beroperasi

- komponen 1 beroperasi dan komponen 2 gagal
- komponen 1 gagal dan komponen 2 beroperasi
- kedua komponen mengalami kegagalan

Gambar 2.11 mengilustrasikan state space diagram dari sebuah sistem yang terdiri dari dua komponen yang berbeda dengan laju kegagalan dan laju perbaikan untuk masing-masing komponen dinyatakan oleh  $\lambda_1$  dan  $\mu_1$  serta  $\lambda_2$  dan  $\mu_2$ .



*Gambar 2.11  
State-space diagram dua komponen berbeda yang mampu-rawat*

### 2.5.3.3. Pemodelan lebih dari dua komponen yang mampu-rawat

Jumlah dari state dalam state space diagram akan bertambah seiring dengan bertambahnya komponen dalam sistem. Jika semua state ditunjukkan, maka jumlah state dalam diagram adalah  $2^n$  untuk n-komponen sistem yang masing-masing komponen dipresentasikan kedalam sebuah 2-state model dan  $3^n$  jika masing-masing komponen mempunyai sebuah derated space.

### 2.5.4. Stochastic Transitional Probability (STP) Matrix untuk Continous Markov

Pada continuous Markov interval waktu yang diskrit bukan merupakan bagian spesifikasi permasalahan, sebagai gantinya akan dipakai pertambahan waktu  $\Delta t$ , yang intervalnya cukup pendek sehingga probabilitas untuk terjadinya lebih dari satu kegagalan pada interval waktu itu dapat dihindarkan.

Matrix STP untuk continuous Markov dapat diturunkan dengan menggunakan terminologi yang sudah didiskritkan karena probabilitas terjadinya dari sebuah transisi pada interval waktu ini sama dengan laju perpindahan dikali dengan interval waktu. Jika laju kegagalan sebuah komponen adalah  $\lambda$  maka probabilitas dari sebuah kegagalan pada waktu  $\Delta t$  adalah  $\lambda\Delta t$  dan probabilitas untuk tidak mengalami kegagalan pada interval  $\Delta t$  ini adalah  $1 - \lambda\Delta t$ .

Untuk kasus komponen yang mampu-rawat seperti pada gambar 2.11, maka matrix STPnya adalah :

$$P = \begin{bmatrix} 1 - \lambda\Delta t & \lambda\Delta t \\ \mu\Delta t & 1 - \mu\Delta t \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

catatan :  $\Delta t$  dapat dihilangkan menjadi :

$$P = \begin{bmatrix} 1 - \lambda & \lambda \\ \mu & 1 - \mu \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

### 2.5.5. Evaluasi Limiting State Probability

Evaluasi untuk stochastic transitional probability matrik adalah menggunakan evaluasi limiting state probability. Pendekatan ini dipakai untuk

mendefinisikan  $\alpha$  sebagai vector limiting state probability, yang mana vector ini tidak dapat diubah ketika dikalikan dengan stochastic transitional probability matrix, dapat dituliskan :

$$\alpha \mathbf{P} = \alpha \quad (2.29)$$

Jika  $\alpha$  adalah  $[P_o \ P_1]$ , untuk single repairable komponen maka dari persamaan (2.28) didapatkan :

$$\begin{bmatrix} P_o & P_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1-\lambda & \lambda \\ \mu & 1-\mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_o & P_1 \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

yang mana jika ditulis dalam formula explisit menjadi :

$$(1-\lambda)P_o + \mu P_1 = P_o \quad (2.31)$$

$$-\lambda P_o + (1-\mu)P_1 = P_1 \quad (2.32)$$

perubahan persamaannya menjadi ;

$$-\lambda P_o + \mu P_1 = 0 \quad (2.33)$$

$$P_o + P_1 = 1 \quad (2.34)$$

yang mana persamaan (2.32) dihilangkan diganti dengan persamaan (2.34)

## 2.6. Kemampu-rawatan (*Maintainability*) dan Ketersediaan (*Availability*)

Pengertian yang lebih mendalam tentang defenisi maintainability dan availability sangat diperlukan sebagai dasar kuantitatif untuk analisa sistem yang repairable (*E.E. Lewis*).

### 2.6.1. Kemampu-rawatan (*Maintainability*)

*Maintainability* diartikan sebagai probabilitas kegagalan suatu sistem dalam memulihkan kondisi sistem seperti semula pada jangka waktu tertentu. *Maintainability* dapat diartikan dengan waktu rata-rata perbaikan (*mean time to repair*). Upaya untuk mengoptimalkan perawatan, baik bentuk maupun biaya perawatan telah banyak dilakukan yang kesemuanya bertujuan untuk menjaga ketersediaan (availability) sistem.

#### 2.6.1.1. Ekonomi dari reparasi dan perawatan

Teknik perawatan yang dikonsentrasi untuk saat ini adalah jenis perawatan pencegahan secara periodik. Ini menyebabkan bertambahnya MTTF komponen yang mempunyai laju kegagalan yang semakin meningkat. Perawatan preventif mengurangi frekuensi reparasi komponen yang repairable. Penambahan frekuensi perawatan (sebagai dampaknya akan mengurangi waktu antara dua perawatan) lebih lanjut akan mengurangi frekuensi reparasi. Permasalahannya adalah berapa waktu optimum diantara dua perawatan. Waktu optimum dari dua perawatan adalah tergantung pada biaya relatif dari reparasi dan pemeliharaan.

Misalkan :  $C_R$  = Nilai reparasi

$C_M$  = Nilai suatu perawatan

Jika  $C_R$  dan  $C_M$  nilainya kira-kira hampir sama, maka pelaksanaan perawatan akan menjadi tidak ekonomis. Untungnya dalam banyak hal  $C_R \ll C_M$ , dan pelaksanaan perawatan dapat ditentukan bagi komponen dengan laju kegagalan

yang semakin meningkat. Harga total per unit waktu untuk perbaikan dan perawatan adalah :

$$K = C_R f_R + C_M f_M \quad (2.35)$$

dimana :  $f_R$  = frekuensi reparasi

$f_M$  = frekuensi perawatan

### 2.6.2. Ketersediaan (*Availability*)

Ketersediaan (*availability*) dapat diartikan sebagai peluang atau probabilitas suatu komponen atau sistem dalam melakukan fungsinya ketika diperlukan pada waktu t.

Analisa rekayasa ketersediaan (*availability engineering analysis*) adalah sebuah metodologi yang dapat membantu dalam memperbaiki produktivitas suatu plant atau sistem, karena optimasi produktivitas plant direkomendasikan pada hasil analisa ketersediaan.

MTTR = ukuran kemampu-rawatan komponen

MTTF = ukuran keandalan komponen

Perbandingan antara nilai keandalan dan kemampu-rawatan komponen digunakan untuk meminimalkan biaya secara keseluruhan. Sehingga analisa ketersediaan bertujuan untuk meminimalkan harga ini sebagai tambahan dari pemenuhan seluruh spesifikasi yang telah ditetapkan.

Misal :  $\lambda$  = laju kegagalan

$\mu$  = laju perbaikan

$$\text{Maka } MTTF = \frac{1}{\lambda} \quad MTTR = \frac{1}{\mu}$$

$$\text{dan } A = Availability = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR} \quad (2.36)$$

$$\text{sehingga } MTTR = \left[ \frac{1-A}{A} \right] MTTF \quad (2.37)$$

**BAB III**  
**METODE PENELITIAN**

## BAB III

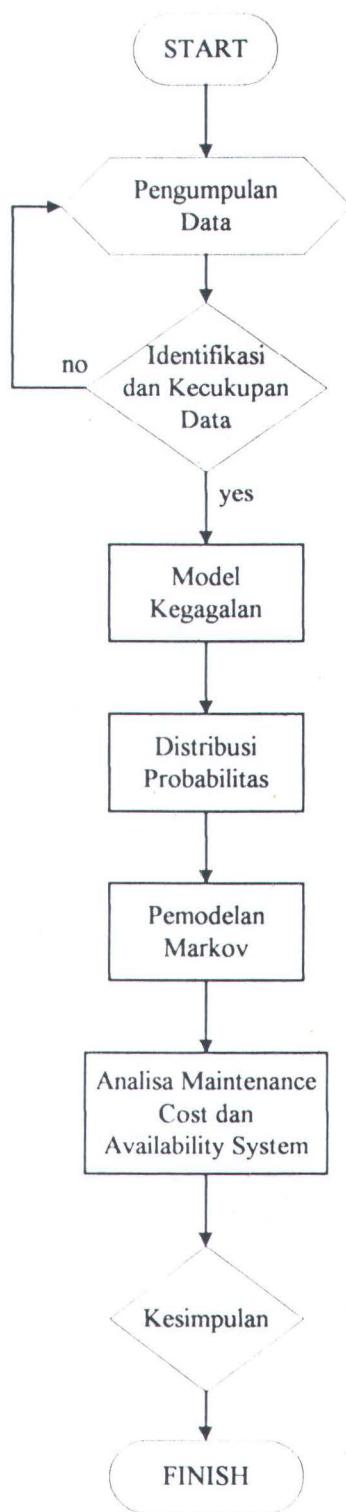
### METODE PENELITIAN

Penyusunan metode penulisan ini dimaksudkan untuk mencapai tujuan tugas akhir yang telah ditentukan. Sebagaimana yang telah dijelaskan pada Bab I bahwa tujuan tugas akhir ini adalah untuk menerapkan salah satu teknik analisa reliability, yaitu analisa laju kegagalan (*failure rate*) dan metode Markov untuk mengetahui perkiraan maintenance cost dan nilai ketersediaan (*availability*) komponen atau system yang mampu -rawat (*repairable*).

Analisa dilakukan pada sebuah merk diesel generator yaitu Yanmar 6 KHL-STN 360 HP 1500 Rpm yang beroperasi pada kapal Caraka Jaya Niaga III-17 dan Caraka Jaya Niaga III-24 milik PT Pelayaran Meratus dalam periode maintenance record tahun 1997 s/d tahun 2000 (4 tahun). Data-data diambil dari maintenance record diesel engine dalam periode itu.

Proses analisa dimulai dengan menentukan model kegagalan dari masing-masing diesel generator. Model kegagalan diketahui dengan cara menentukan variable randomnya terlebih dahulu. Variabel random ini adalah Time to Failure (TTF) dari komponen. Time to Failure (TTF) merupakan variabel penting dalam analisa kegagalan, karena Time to failure ini mengikuti salah satu distribusi probabilitas yang sudah kita kenal, seperti eksponensial, weibull, normal, poisson, dan sebagainya. Pada kasus diesel generator ini asumsi distribusi probabilitas yang dipakai adalah distribusi eksponensial karena mengacu pada karakteristik kegagalan yang menggambarkan usefull life period dalam kurva bath-up. Proses

selanjutnya adalah melakukan pemodelan Markov dengan cara membuat diagram ruang keadaan (*state space diagram*) komponen yang dinyatakan oleh laju transisi komponen dari keadaan beroperasi menuju keadaan gagal dan matrik probabilitas transisinya. Sebagai outputnya adalah perhitungan maintenance cost dan availability system, yang hasilnya dipakai untuk membuat suatu kesimpulan. Guna memperjelas langkah-langkah diatas, metode penulisan tugas akhir ini dapat dilihat pada alur di bawah ini (gambar 3.1).



Gambar 3.1  
Alur Metodologi Penulisan.

### **3.1. Pengumpulan Data**

Data-data yang dikumpulkan yaitu berupa maintenance record diesel generator untuk periode tahun 1997 sampai tahun 2000, data kapal (*general description*), spesifikasi diesel generator, dan *Instruction Book* untuk diesel generator engine untuk mengetahui pengoperasian komponen-komponennya .

### **3.2. Identifikasi dan Kecukupan Data**

Data yang sudah dikumpulkan kemudian diidentifikasi atau disortir. Penyortiran dilakukan dengan memilih komponen-komponen diesel generator yang sering gagal, yang ter-record pada maintenance recordnya. Caranya dengan membandingkan frekuensi kegagalannya dan frekuensi penggantian (*replacement*) komponen. General description kapal berguna untuk mengetahui dimensi utama kapal, termasuk rute pelayaran kapal dan waktu diesel generator diinstal. Setelah data yang dibutuhkan dinilai cukup maka analisa dilanjutkan pada langkah berikutnya.

### **3.3. Model Kegagalan**

Proses untuk mengetahui model kegagalan dari diesel generator dilakukan dengan menentukan variable random komponen terlebih dahulu. Disini Time to Failure (TTF) komponen dipilih sebagai variable randomnya. Model kegagalan ditunjukkan oleh TTF komponen yang dikelompokkan secara seri. TTF inilah yang mengikuti salah satu distribusi probabilitas, seperti distribusi eksponensial, Poisson, Weibull dan sebagainya. Sedangkan kriteria untuk masing-masing

distribusi yang akan terbentuk ditunjukkan dengan metode *Maximum Likelihood Estimate (mle)*, berdasarkan nilai *likelihood* maximum yang dihasilkan.

Dari hasil analisa mle akan diketahui distribusi-distribusi probabilitas yang dibentuk system. Diantara distribusi tersebut dipilih distribusi eksponensial sebagai asumsi awal. Alasan dipilihnya distribusi eksponensial ini dikarenakan karakteristik kegagalan sistem menunjukkan *useful life period* dalam *bath-up curve*.

### 3.4. Pemodelan Markov

Pemilihan pendekatan Markov untuk analisa ini adalah berdasarkan keadaan system yang stasioner dan homogen.

Proses Markov yang dipilih adalah Proses Markov Kontinyu karena system diasumsikan berdistribusi secara kontinyu terhadap waktu. Parameter-parameter yang dipakai yaitu  $\lambda$  (laju kegagalan) dan  $\mu$  (laju perbaikan) yang menunjukkan laju transisi (*transition rate*) yang masing-masing mewakili laju perubahan komponen dari keadaan beroperasi dan perubahan dari keadaan gagal.

Langkah selanjutnya dilakukan pengkonstruksian diagram ruang keadaan (*State Space Diagram*) dengan memasukkan semua laju perubahan (*transition rate*). Perlu diperhatikan bahwa semua state yang relevan dimana system dapat berada harus disertakan pada diagram termasuk juga perubahan dari satu state ke state lain.

Konstruksi diagram ruang keadaan yang sudah terbentuk, kemudian diekspresikan dalam bentuk matrik yang biasa disebut Stochastic Transitional

Probability (STP) matrik. Tujuannya untuk mengetahui probabilitas transisi dari satu state ke state lain dalam interval waktu tertentu. Sehingga keadaan komponen pada setiap state dapat dievaluasi yang hasilnya digunakan untuk analisa maintenance cost dan availability.

### **3.5. Analisa Maintenance Cost dan Availability System**

#### **3.5.1. Perhitungan Maintenance Cost**

Pada perhitungan maintenance cost perlu diperhatikan waktu optimum antara dua perawatan. Waktu optimum ini tergantung dari biaya relatif dari reparasi dan perawatan. Harga total per unit waktu adalah meliputi biaya untuk perbaikan dan perawatan. Variabel yang digunakan disini yaitu :

- Nilai reparasi ( $C_R$ )
- Nilai suatu perawatan ( $C_M$ )
- Frekuensi reparasi ( $f_R$ )
- Frekuensi perawatan ( $f_M$ )

#### **3.5.2. Perhitungan Availability System**

Parameter yang dipakai pada perhitungan availability adalah  $\lambda$  (laju kegagalan) dan  $\mu$  (laju perbaikan) untuk selanjutnya dipakai sebagai variabel dalam menentukan MTTR (*Mean Time to Repair*) dan MTTF (*Mean Time to Failure*). Setelah diketahui MTTR dan MTTF system maka nilai availability sistem bisa ditentukan.

### 3.6. Kesimpulan

Tahap akhir dalam metode penulisan ini adalah pengambilan kesimpulan berdasarkan hasil perhitungan maintenance cost dan availability system.

**BAB IV**  
**ANALISA DATA**

## **BAB IV**

### **ANALISA DATA**

Pada bab ini akan diuraikan langkah-langkah pengolahan data yang telah dijelaskan pada Bab III. Data-data kegagalan , repair dan time to failure diambil dari diesel generator Yanmar 6 KHL-STN 360 HP 1500 Rpm yang beroperasi pada kapal Caraka Jaya Niaga III-17 dan Caraka Jaya Niaga III-24 milik PT Pelayaran Meratus dalam periode maintenance record tahun 1997 s/d tahun 2000 (4 tahun). Data-data tersebut diambil dari maintenance record diesel engine dalam periode itu, sedangkan cara kerja diesel generator dan sistem—sistem penunjangnya diketahui melalui Instruction dan Specification Book Diesel Generator. Data-data untuk repair dan lama repair diperoleh dari lapangan dengan wawancara langsung.

Proses analisa dimulai dengan melakukan pemilihan komponen-komponen diesel generator yang sering gagal, repair dan sering mengalami penggantian (*replacement*). Komponen ini diseleksi berdasarkan sistem-sistem yang bekerja pada diesel engine tersebut, yang meliputi fuel system, lubrication system, cooling system, turbocharger dan generator (*auxiliary engine*).

Proses selanjutnya menentukan model kegagalan dari masing-masing komponen diesel generator. Model kegagalan diketahui dengan cara menentukan variabel randomnya terlebih dahulu. Variabel random ini adalah Time to Failure (TTF) dari komponen. Data TTF diolah dan diuji dengan bantuan software Weibull ++ dan dipilih metode Maksimum Likelihood Estimation (MLE) untuk

estimasi parameter distribusinya. Pada kasus diesel generator ini distribusi probabilitas yang dipakai adalah distribusi eksponensial karena mengacu pada karakteristik kegagalan yang menggambarkan usefull life period dalam kurva bath-up dan persyaratan yang harus dipenuhi oleh metode Markov.

Pemodelan Markov dengan cara membuat diagram ruang keadaan (*state space diagram*) komponen yang dinyatakan oleh laju transisi komponen dari keadaan beroperasi menuju keadaan gagal (*failure rate*) atau dari keadaan gagal menuju beroperasi kembali (*repair rate*), dari state space diagram dapat dibuat matrik probabilitas transisinya. Perhitungan matrik probabilitas dilakukan dengan bantuan software Matlab Sebagai output akhir adalah perhitungan maintenance cost dan availability system.

#### 4.1. Deskripsi Obyek Penelitian

Obyek penelitian yang dipakai pada tugas akhir ini adalah diesel generator yang merupakan auxiliary engine yang dioperasikan pada kapal Caraka Jaya III-17 dan kapal Caraka Jaya III-24 milik PT. Pelayaran Meratus Surabaya. Diesel generator ini diinstal pada kapal-kapal tersebut pada saat pembangunan kapal dilaksanakan, yaitu tahun 1993. Merk yang dipakai adalah Yanmar type vertical, single acting 4 – cycle diesel engine. Sedangkan modelnya adalah 6 KHL-STN. Masing-masing diesel generator beroperasi pada 360 HP dengan putaran 1500 rpm. Sedangkan merk generator yang digunakan adalah Taiyo TWY310, 250 KVA. Untuk lebih jelasnya principal data dari diesel engine dan kapal dapat dilihat pada lampiran.A.

#### 4.1.1. Sistem - Sistem dalam Diesel Generator

##### 1. Sistem Bahan Bakar (*Fuel System*)

Sistem bahan bakar tersusun atas komponen :

a. Tanki Bahan Bakar (*Fuel Tank*)

Kondisi tanki bahan bakar harus dipastikan dalam keadaan bersih sebelum diisi bahan bakar, karena bercampurnya fuel dengan air atau kotoran lain akan menimbulkan masalah pada pengoperasian diesel generator. Selain itu pengecekan fuel level harus selalu dilakukan setelah engine beroperasi.

b. Fuel filter dan fuel/water separator

Separator ini berfungsi untuk memisahkan air atau deposit lain yang bercampur dalam bahan bakar.

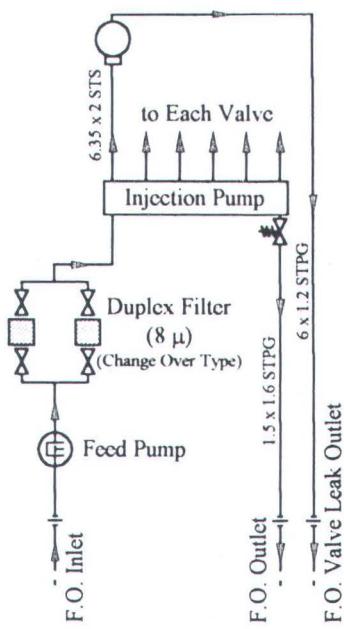
c. Pompa bahan bakar

Berfungsi untuk memompa bahan bakar dari tanki menuju komponen lain.

d. Fuel Injection Nozzle

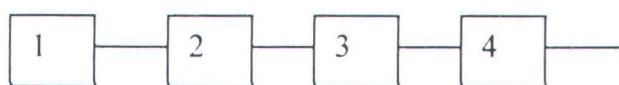
Berfungsi untuk penginjeksian bahan bakar dan tekanan harus selalu diperhatikan, karena jika tekanan kurang dari yang sudah ditentukan pembakaran tidak akan sempurna.

Gambar skema sistem bahan bakar dapat dilihat pada gambar 4.1. di bawah ini.



Gambar 4.1.  
Skema system bahan bakar diesel generator

Adapun prinsip kerja dari system bahan bakar ini adalah dimulai dari pengambilan fuel dari tanki bahan bakar oleh pompa bahan bakar dialirkan menuju separator atau filter, kemudian melalui fuel injection nozzle pembakaran berlangsung. Untuk sisa fuel yang tidak terinjeksi dialirkan kembali menuju tanki fuel melalui pipa overflow. Berdasarkan prinsip kerja ini dapat dibuat block diagram system sebagai berikut :



- dimana :
1. Tanki bahan bakar
  2. Fuel filter dan fuel/water separator
  3. Pompa bahan bakar
  4. Fuel Injection Nozzle

Konstruksi diagram block untuk system bahan bakar berupa series diagram, karena sesuai prinsip kerjanya setiap komponen harus dalam keadaan beroperasi (*up*) agar system dapat beroperasi dan apabila salah satu komponen mengalami kegagalan (*down*), maka system akan gagal beroperasi juga (*down*).

## 2. Sistem Pelumasan (*Lubrication System*)

Sistem pelumasan terdiri dari komponen-komponen :

a. Sump Tank

Berfungsi untuk penyimpanan oil dan tingkat kelevelannya juga harus selalu dicek setelah beroperasi.

b. Lubricating Oil Filter

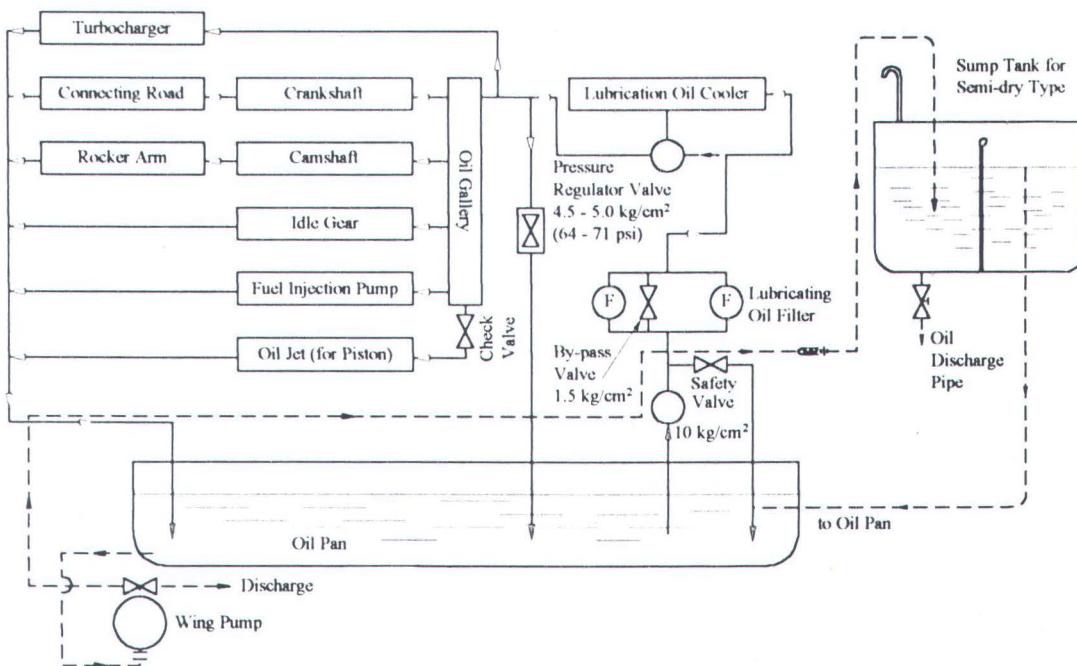
Berguna untuk memisahkan oil and water atau deposit - deposit lainnya.

c. Lubricating oil pump

Berfungsi untuk memompa oil dari oil pan menuju LO cooler

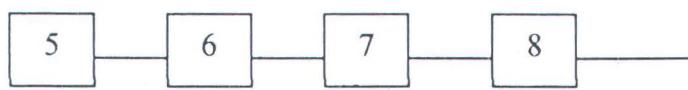
d. LO carter

Gambar skema sistem bahan bakar dapat dilihat pada gambar 4.2. di bawah ini.



*Gambar 4.2.  
Skema sistem pelumasan diesel generator*

Adapun prinsip kerja dari sistem pelumasan diawali pengambilan oil dari oil pan oleh LO pump, dialirkan melalui filter menuju LO cooler. Apabila tekanan dan temperatur sudah memenuhi, maka ditampung di oil gallery yang selanjutnya digunakan untuk melumasi crankshaft, camshaft, idle gear, fuel injection pump, piston, dan turbocharger. Sisa pelumasan dialirkan kembali ke oil pan. Berdasarkan prinsip kerja system dapat dibuat diagram blocknya sebagai berikut :



Dimana : 5. Sump tank

6. Lubricating oil pump
7. Lubricating oil filter
8. LO carter

Konstruksi diagram block untuk system pelumasan ini juga berupa series diagram, karena sesuai prinsip kerjanya setiap komponen harus dalam keadaan beroperasi (*up*) agar system dapat beroperasi dan apabila salah satu komponen mengalami kegagalan (*down*), maka system akan gagal beroperasi juga (*down*).

### 3. Sistem pendingin (*Cooling System*)

Sistem pendingin tersusun atas komponen-komponen :

a. Cooling Water pump

Berfungsi untuk memompa sea water yang digunakan untuk mendinginkan air tawar. Air tawar yang sudah memenuhi temperatur pendinginan dipakai untuk mendinginkan cylinder block.

b. Fresh Water cooler

Berfungsi untuk mendinginkan air tawar

c. LO Cooler

Berfungsi untuk mendinginkan oil

d. Intercooler

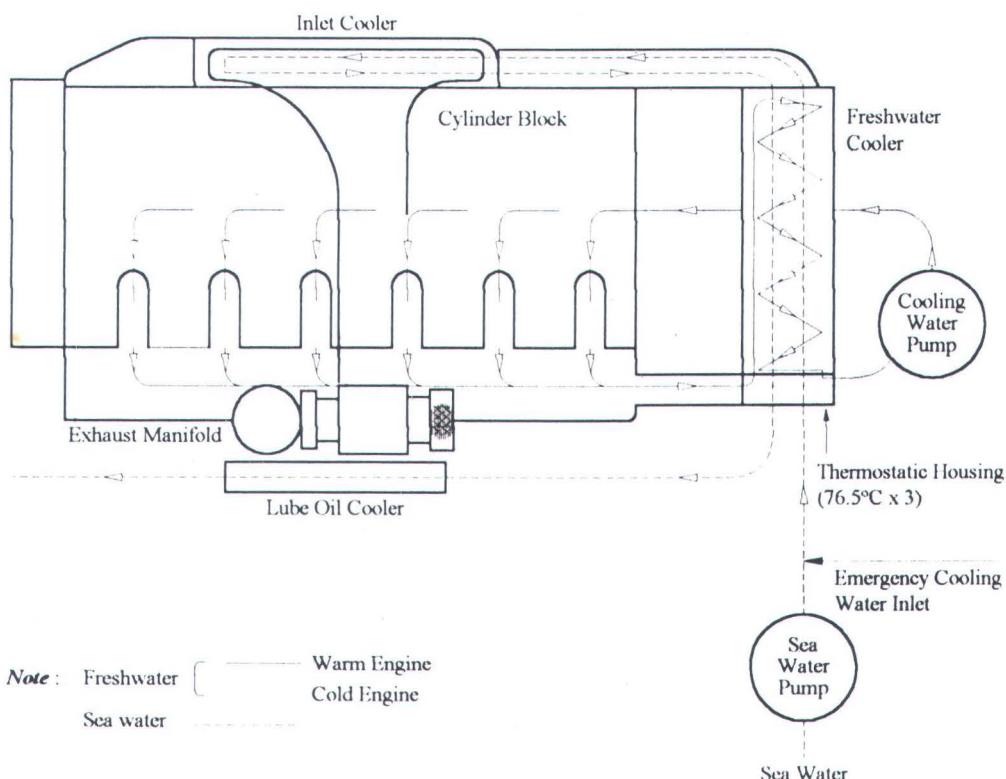
e. Sea Water pump

Berfungsi untuk memompa air laut.

f. Pipa pendingin air laut

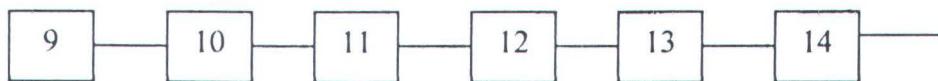
Sebagai alat transfer air laut yang akan dipakai sebagai pendingin.

Gambar skema sistem pendingin dapat dilihat pada gambar 4.3. di bawah ini.



Gambar 4.3.  
Skema system pendingin diesel generator

Prinsip kerja dari system ini intinya komponen-komponen diesel generator didinginkan oleh fresh water, sedangkan fresh water cooler didinginkan oleh air laut. Temperatur air pendingin diatur oleh thermostat valve. Berdasarkan prinsip kerja system dapat dibuat diagram blocknya sebagai berikut :



Dimana : 9. Cooling Water pump

10. Fresh Water cooler

11. LO Cooler

12. Intercooler

13. Sea Water pump

14. Pipa pendingin air laut

Konstruksi diagram block untuk system pendingin ini juga berupa series diagram, karena sesuai prinsip kerjanya setiap komponen harus dalam keadaan beroperasi (*up*) agar system dapat beroperasi dan apabila salah satu komponen mengalami kegagalan (*down*), maka system akan gagal beroperasi juga (*down*).

#### 4. Diesel (Motor Bantu)

Auxiliary engine diesel generator ini terdiri dari :

a. Turbocharger

Turbocharger merupakan performance blower. Jika blower ini kotor maka akan mengakibatkan turunnya tekanan udara intake yang menyebabkan turunnya performance engine. Oleh karena itu komponen yang paling penting dari turbocharger ini adalah penyaring udara intake (*Pre filter air*).

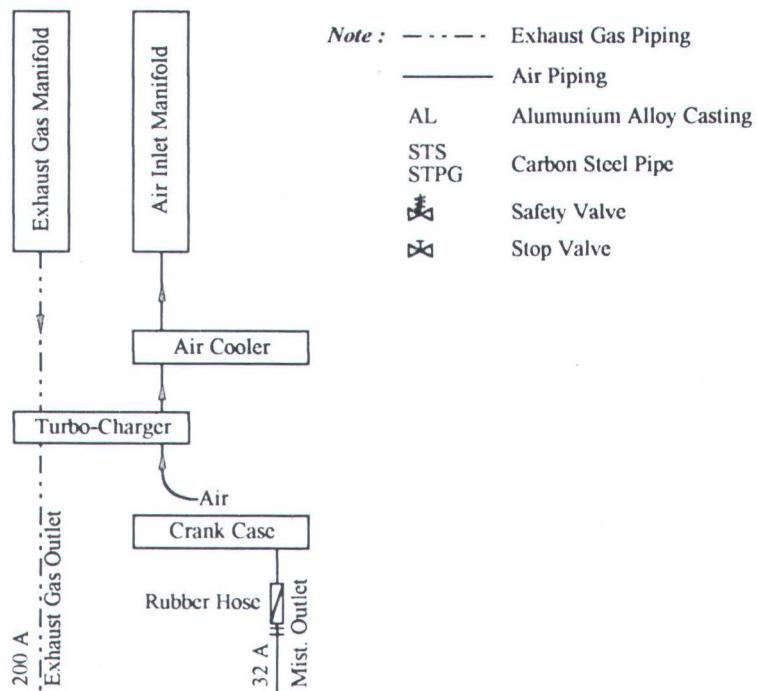
b. Fuel injector

Berfungsi sebagai penginjeksi bahan bakar.

Untuk diesel (motor bantu) ini komponen yang dianalisa hanya turbocharger dan fuel injector, karena sesuai yang tercatat dalam maintenance record.

Gambar skema turbocharger dapat dilihat pada gambar 4.4. di bawah ini.

### Exhaust Gas Air System



*Gambar 4.4.  
Skema turbocharger diesel generator*

Exhaust gas system ini terdiri dari exhaust silencer, exhaust passage dan turbocharger. Exhaust passage berguna untuk laluan gas exhaust menuju atmosfer, sedangkan independent turbocharger berguna untuk meningkatkan density udara setelah permulaan kompressi. Agar density udara yang diminta terpenuhi, maka turbocharger ini juga dilengkapi pendingin udara (air cooler).

Berdasarkan prinsip kerja ini dapat dibuat blok diagramnya sebagai berikut :



Dimana : 15. Turbocharger

16. Fuel injector

Konstruksi diagram block untuk system ini juga berupa series diagram, karena sesuai prinsip kerjanya setiap komponen harus dalam keadaan beroperasi (*up*) agar system dapat beroperasi dan apabila salah satu komponen mengalami kegagalan (*down*), maka system akan gagal beroperasi juga (*down*).

## 5. Generator

Generator berfungsi sebagai pembangkit tenaga listrik di kapal selama melakukan pelayaran dan bongkar muat.

### 4.1.2. Proses Sensor Data

Proses penyortiran data dari maintenance record dilakukan berdasarkan periode maintenance tahun 1997 sampai tahun 2000 pada diesel generator merk YANMAR 6 KHL-STN 360 HP 1500 rpm yang dioperasikan pada kapal Caraka Jaya Niaga III-17 dan Caraka Jaya Niaga III-24. Berdasarkan data Plan Maintenance Sistem (PMS) diesel generator dapat diketahui komponen-komponen diesel generator yang akan dilakukan perawatan. Kemudian dari

maintenance record kapal dapat diketahui komponen-komponen diesel generator yang mengalami repair maupun replacement.

Data repair dan replacement komponen dikelompokkan berdasarkan sistem-sistem yang bekerja pada diesel generator secara random. Sistem tersebut meliputi fuel sistem, lubricating oil sistem, cooling sistem, turbocharger, dan generator. Untuk lebih jelasnya sistem-sistem tersebut dapat dilihat pada spesifikasi diesel engine (lampiran A). Dari sistem-sistem tersebut didapatkan 16 komponen yang mempunyai frekuensi repair dan replacement cenderung semakin bertambah. Komponen tersebut dapat dilihat pada tabel 4.2.

#### **4.2. Pengolahan Data**

Data frekuensi kegagalan, repair dan replacement dari komponen yang sudah dikelompokkan berdasarkan sistemnya diatas, dikalkulasi untuk mengetahui rata-rata failure rate per harinya. Data dapat dilihat pada lampiran B.

Tabel 4.1 menunjukkan data rata-rata laju kegagalan (*failure rate*) per hari komponen-komponen diatas, yang mana dari tabel terlihat bahwa Lubricating Oil filter merupakan komponen yang mempunyai rata-rata laju kegagalan per hari yang paling tinggi, yaitu sebesar 0,09384, disusul LO Carter sebesar 0,06233 dan Fuel Oil filter sebesar 0,05069. Sedangkan komponen yang mempunyai rata-rata laju kegagalan (*failure rate*) per hari paling rendah adalah Nozzle injector bahan bakar, yaitu sebesar 0.00137.

Tabel 4.1. Rata-rata laju kegagalan komponen per hari

No.	COMPONENT	Number of Failure 1997 - 2000						TOTAL FAILURE	DURASI	AVERAGE PER DAY			
		CARAKA JAYA NIAGA III-17			CARAKA JAYA NIAGA III-24								
		AE Kanan	AE Tengah	AE Kiri	AE Kanan	AE Tengah	AE Kiri						
1	LO filter	10	26	23	22	28	28	137	1460 hari	0,09384			
2	LO carter	6	11	10	18	23	23	91	1460 hari	0,06233			
3	LO Pump	1	1	0	1	0	0	3	1460 hari	0,00205			
4	Sump tank	0	1	0	0	0	0	1	1460 hari	0,00068			
5	FO filter	10	11	10	11	17	15	74	1460 hari	0,05068			
6	FO tank	1	0	0	0	0	0	1	1460 hari	0,00068			
7	FO pump	1	0	0	1	0	0	2	1460 hari	0,00137			
8	FW cooler	3	2	5	15	14	20	59	1460 hari	0,04041			
9	LO cooler	3	2	3	8	10	12	38	1460 hari	0,02603			
10	Intercooler	1	0	2	3	0	1	7	1460 hari	0,00479			
11	Cooling water pump	1	0	1	0	0	0	2	1460 hari	0,00137			
12	Sea water pump	0	1	0	0	1	1	2	1460 hari	0,00137			
13	Pipa pendingin SW	4	2	2	0	1	1	10	1460 hari	0,00685			
14	Turbocharge	8	8	11	1	1	1	30	1460 hari	0,02055			
15	Nozzle injector	0	0	0	0	2	2	4	1460 hari	0,00274			
16	Generator	0	0	0	0	0	0	0	1460 hari	0			

#### 4.2.1. Perhitungan Laju Kegagalan System

Perhitungan laju kegagalan system untuk diesel generator ini dilakukan berdasarkan data laju kegagalan tiap-tiap komponen yang diasumsikan terjadi per 1 juta jam. Tabel 4.2 menunjukkan data laju kegagalan komponen yang direcord berdasarkan data time to failure pada tabel 4.1. Laju kegagalan komponen digunakan untuk perhitungan laju kegagalan sistem sesuai dengan konstruksi block diagram sistem yang sudah dibuat. Pada diesel generator ini semua sistemnya mempunyai konstruksi series block diagram. Sehingga untuk laju kegagalan sistem dengan series diagram secara matematis dapat dituliskan :

$$\lambda(s) = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \dots + \lambda_n$$

dimana :  $\lambda(s)$  = laju kegagalan sistem series

$\lambda_1$  = laju kegagalan komponen 1

$\lambda_n$  = laju kegagalan komponen n

Sehingga untuk masing-masing sistem diperoleh hasil perhitungan laju kegagalan sistem seperti pada tabel 4.3.

Tabel 4.2. Laju Kegagalan (*Failure Rate*) Komponen per hours

No.	COMPONENT	TOTAL FAILURE	FAILURE RATE ( f/hours)
1	LO filter	137	0,00391
2	LO Carter	91	0,00259
3	LO pump	3	0,00008
4	Sump Tank	1	0,00003
5	FO filter	74	0,00211
6	FO tank	1	0,00009
7	FO pump	2	0,00006
8	FW cooler	59	0,00168
9	LO Cooler	38	0,00109
10	Intercooler	7	0,00019
11	Cooling water pump	2	0,00006
12	SW pump	2	0,00006
13	Pipa pendingin SW	10	0,00029
14	Turbocharge	30	0,00086
15	Nozzle Injector	4	0,00011
16	Generator	0	0

Dari hasil perhitungan laju kegagalan komponen masing-masing sistem yang dijumlahkan, didapatkan laju kegagalan sistem pada tabel 4.3.

Tabel 4.3. Tabel laju kegagalan (failure rate) system diesel generator.

No.	SYSTEM	FAILURE RATE ( f/hours)
1	FO System	0,00225
2	LO System	0,00662
3	Cooling System	0,00337
4	Auxiliary Engine	0,00097
5	Generator	0

Hasil perhitungan laju kegagalan sistem menunjukkan untuk lubricating oil system mempunyai laju kegagalan terbesar, yaitu 0,00662 dan untuk generator laju kegagalannya diasumsikan = 0, karena selama periode 4 tahun maintenance record tersebut hampir tidak pernah mengalami kegagalan. Selanjutnya hasil perhitungan laju kegagalan sistem ini dipakai untuk analisa pada pemodelan Markov.

#### 4.2.2. Model Kegagalan Komponen

Model kegagalan komponen diesel generator dapat diketahui dengan cara menentukan variabel random komponen terlebih dahulu. Variabel random yang dipakai adalah Time to Failure (TTF) komponen. Data Time to Failure komponen dapat dilihat pada halaman lampiran B.

Kemudian data tersebut diuji untuk mengetahui jenis distribusi yang digunakan, termasuk parameter-parameter distribusinya yang nantinya dipakai dalam memperhitungkan nilai keandalan, failure rate dan Mean Time to Failure komponen. Pengujian dan pengolahan data ini dibantu dengan software Weibull ++ dengan metode *Maksimum Likelihood Estimation (MLE)*. Distribusi yang digunakan dalam pengujian adalah distribusi eksponensial (sesuai persyaratan Markov). Pengujian hanya dilakukan pada komponen yang mempunyai frekuensi kegagalan lebih dari 3 kali. Kurva grafik hasil pengujian dapat dilihat dalam lampiran C, sedangkan analisa kurva grafiknya adalah sebagai berikut :

#### 4.2.2.1. Fuel Oil Filter

1. Analisa grafik untuk FO Filter :

- a. Dari grafik unreliability, gb. C.1a. dapat dilihat bahwa untuk Fuel Oil Filter mempunyai probabilitas kegagalan (ketakandalan) semakin menurun seiring bertambahnya waktu dan memiliki nilai ketakandalan mendekati 100% pada saat 500 jam operasi, sedangkan memasuki 2000 jam operasi nilai ketakandalannya semakin turun.
- b. Grafik reliability, gb. C.1b menunjukkan bahwa nilai keandalan FO Filter mendekati 1 pada saat pengoperasian 0 – 474.43 jam. Kemudian setelah 474.43 jam nilai keandalannya menurun hingga akan mencapai nilai keandalan jika pengoperasian mendekati 2000 jam operasi.
- c. Grafik failure rate FO Filter, gb. C.1c memperlihatkan bahwa laju kegagalan FO Filter adalah konstan pada 0.0033, sesuai karakteristik distribusi eksponensial.
- d. Grafik Probability Density Function, gb. C.1d. menunjukkan bahwa FO Filter akan mengalami kegagalan pada waktu cenderung menurun dalam selang waktu 0 – 2000 jam operasi. Ini menggambarkan periode burn-in dalam bath-up curve (komponen dalam kondisi belum mengalami kegagalan)

2. Perhitungan parameter-parameter keandalan

Berdasarkan hasil pengujian dengan sofware Weibull ++ diperoleh parameter-parameter distribusi eksponensial sebagai berikut :

$$\lambda = 0.0033$$

$$\gamma = 474.43 \text{ jam}$$

- a. Perhitungan Probability Density Function untuk FO Filter pada  $t = 500$  jam :

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$$

$$f(t) = 0,0033e^{-0,0033(500)}$$

$$f(t) = 0,0007363$$

- b. Perhitungan nilai Reliability  $R(t)$  untuk FO Filter pada  $t = 500$  jam :

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

$$R(t) = 0,19205$$

Sehingga nilai Unreliability  $Q(t)$  FO Filter diperoleh :

$$Q(t) = 1 - R(t) = 0,8079$$

- c. Perhitungan MTTF untuk FO Filter :

$$MTTF = \frac{1}{\lambda} = 303,03 \text{ jam}$$

#### 4.2.2.2. Nozzle Injector Bahan Bakar

1. Analisa grafik untuk nozzle injector bahan bakar :

- a. Dari grafik unreliability, gb. C.9a. dapat dilihat bahwa untuk nozzle injector bahan bakar mempunyai probabilitas kegagalan (ketakandalan) semakin menurun seiring bertambahnya waktu dan memiliki nilai ketakandalan

mendekati 100% pada saat 1000 jam operasi, sedangkan memasuki 1400 jam operasi nilai ketakandalannya semakin turun.

- b. Grafik reliability, gb. C.9b. menunjukkan bahwa nilai keandalan nozzle injector bahan bakar mendekati 1 pada saat pengoperasian 0 – 993,29 jam. Kemudian setelah 993,29 jam nilai keandalannya menurun hingga akan mencapai nilai keandalan jika pengoperasian mendekati 1394,63 jam operasi.
- c. Grafik failure rate nozzle injector bahan bakar, gb. C.9c. memperlihatkan bahwa laju kegagalan nozzle injector bahan bakar adalah konstan pada 0.0195, sesuai karakteristik distribusi eksponensial.
- d. Grafik Probability Density Function untuk nozzle injector bahan bakar, gb. C.9d. menunjukkan bahwa nozzle injector bahan bakar akan mengalami kegagalan pada waktu cenderung menurun dalam selang waktu 0 – 1193,96 jam operasi. Ini menggambarkan periode burn-in dalam bath-up curve (komponen dalam kondisi belum mengalami kegagalan) dan mulai 1193,96 jam operasi ini komponen mulai memasuki periode usefull.

## 2. Perhitungan parameter-parameter keandalan

Berdasarkan hasil pengujian dengan sofware Weibull ++ diperoleh parameter-parameter distribusi eksponensial sebagai berikut :

$$\lambda = 0.0195$$

$$\gamma = 993.2872 \text{ jam}$$

- a. Perhitungan Probability Density Function untuk Nozzle Injector Bahan Bakar pada  $t = 500$  jam :

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$$

$$f(t) = 0,0195e^{-0,0195(500)}$$

$$f(t) = 1.1367E - 6$$

- b. Perhitungan nilai Reliability  $R(t)$  untuk FO Filter pada  $t = 500$  jam :

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

$$R(t) = 5.8295E - 5$$

Sehingga nilai Unreliability  $Q(t)$  FO Filter diperoleh :

$$Q(t) = 1 - R(t) = 0,9999$$

- c. Perhitungan MTTF untuk FO Filter :

$$MTTF = \frac{1}{\lambda} = 51.282 \text{ jam}$$

#### 4.2.2.3. Lubricating Oil Filter

1. Analisa grafik untuk oil filter :

- a. Dari grafik unreliability dapat dilihat bahwa untuk oil filter, gb. C.2a. menunjukkan probabilitas kegagalan (ketakandalan) semakin menurun seiring bertambahnya waktu dan memiliki nilai ketakandalan mendekati 100% pada saat 275 jam operasi, sedangkan memasuki 1000 jam operasi nilai ketakandalannya semakin turun.
- b. Grafik reliability, gb. C.2b. menunjukkan bahwa nilai keandalan oil filter mendekati 1 pada saat pengoperasian 0 – 250 jam. Kemudian setelah 250

jam nilai keandalannya menurun hingga akan mencapai nilai keandalan jika

pengoperasian melebihi 1000 jam operasi.

- c. Grafik failure rate oil filter, gb. C.2c. memperlihatkan bahwa laju kegagalan oil filter adalah konstan pada 0.0041, sesuai karakteristik distribusi eksponensial.
- d. Grafik Probability Density Function untuk oil filter, gb. C.2d. menunjukkan bahwa oil filter akan mengalami kegagalan pada waktu cenderung menurun dalam selang waktu 0 – 1000 jam operasi. Ini menggambarkan periode burn-in dalam bath-up curve (komponen dalam kondisi belum mengalami kegagalan).

◦

## 2. Perhitungan parameter-parameter keandalan

Berdasarkan hasil pengujian dengan sofware Weibull ++ diperoleh parameter-parameter distribusi eksponensial sebagai berikut :

$$\lambda = 0.0041$$

$$\gamma = 250 \text{ jam}$$

- a. Perhitungan Probability Density Function untuk LO Filter pada  $t = 500$  jam :

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$$

$$f(t) = 0,0041e^{-0,0041(500)}$$

$$f(t) = 0.0005278$$

- b. Perhitungan nilai Reliability  $R(t)$  untuk LO Filter pada  $t = 500$  jam :

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

$$R(500) = 0,1287$$

Sehingga nilai Unreliability  $Q(t)$  LO Filter diperoleh :

$$Q(t) = 1 - R(t) = 0,8713$$

- c. Perhitungan MTTF untuk LO Filter :

$$MTTF = \frac{1}{\lambda} = 243.9 \text{ jam}$$

#### 4.2.2.4. Lubricating Oil Carter

1. Analisa grafik untuk oil carter :

- a. Dari grafik unreliability, gb. C.4a. dapat dilihat bahwa untuk oil carter mempunyai probabilitas kegagalan (ketakandalan) semakin menurun seiring bertambahnya waktu dan memiliki nilai ketakandalan mendekati 100% pada saat 420 jam operasi, sedangkan memasuki 600 jam operasi nilai ketakandalannya semakin turun.
- b. Grafik reliability, gb. C.4b. menunjukkan bahwa nilai keandalan oil filter mendekati 1 pada saat pengoperasian 0 – 419 jam. Kemudian setelah 419 jam nilai keandalannya menurun hingga akan mencapai nilai keandalan jika pengoperasian melebihi 825,7 jam operasi.
- c. Grafik failure rate oil filter, gb. C.4c. memperlihatkan bahwa laju kegagalan oil filter adalah konstan pada 0.0128, sesuai karakteristik distribusi eksponensial.

d. Grafik Probability Density Function untuk oil filter, gb. C.4d. menunjukkan bahwa oil filter akan mengalami kegagalan pada waktu cenderung menurun dalam selang waktu 0 – 651,4 jam operasi. Ini menggambarkan periode burn-in dalam bath-up curve (komponen dalam kondisi belum mengalami kegagalan).

2. Perhitungan parameter-parameter keandalan

Berdasarkan hasil pengujian dengan software Weibull ++ diperoleh parameter-parameter distribusi eksponensial sebagai berikut :

$$\lambda = 0.0128$$

$$\gamma = 419 \text{ jam}$$

a. Perhitungan Probability Density Function untuk LO carter pada  $t = 500$  jam

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$$

$$f(t) = 0,0128e^{-0,0128(500)}$$

$$f(t) = 0,00002127$$

b. Perhitungan nilai Reliability  $R(t)$  untuk LO carter pada  $t = 500$  jam :

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

$$R(t) = 0,001662$$

Sehingga nilai Unreliability  $Q(t)$  LO carter diperoleh :

$$Q(t) = 1 - R(t) = 0,998$$

c. Perhitungan MTTF untuk LO carter :

$$MTTF = \frac{1}{\lambda} = 78,125 \text{ jam}$$

#### 4.2.2.5. Fresh Water Cooler

1. Analisa grafik untuk Fresh water cooler :

- a. Dari grafik unreliability, gb. C.6a. dapat dilihat bahwa untuk fresh water cooler mempunyai probabilitas kegagalan (ketakandalan) semakin menurun seiring bertambahnya waktu dan memiliki nilai ketakandalan mendekati 100% pada saat 280 jam operasi, sedangkan memasuki 700 jam operasi nilai ketakandalannya semakin turun.
- b. Grafik reliability, gb. C.6b. menunjukkan bahwa nilai keandalan fresh water cooler mendekati 1 pada saat pengoperasian 0 – 266 jam. Kemudian setelah 266 jam nilai keandalannya menurun hingga akan mencapai nilai keandalan jika pengoperasian melebihi 1000 jam operasi.
- c. Grafik failure rate oil filter, gb. C.6c. memperlihatkan bahwa laju kegagalan fresh water cooler adalah konstan pada 0.0044, sesuai karakteristik distribusi eksponensial.
- d. Grafik Probability Density Function untuk fresh water cooler, gb. C.6d. menunjukkan bahwa oil filter akan mengalami kegagalan pada waktu cenderung menurun dalam selang waktu 0 – 1000 jam operasi. Ini menggambarkan periode burn-in dalam bath-up curve (komponen dalam kondisi belum mengalami kegagalan).

## 2. Perhitungan parameter-parameter keandalan

Berdasarkan hasil pengujian dengan software Weibull ++ diperoleh parameter-parameter distribusi eksponensial sebagai berikut :

$$\lambda = 0.0044$$

$$\gamma = 266 \text{ jam}$$

- a. Perhitungan Probability Density Function untuk fresh water cooler pada  $t = 500$  jam :

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$$

$$f(t) = 0,0044e^{-0,0044(500)}$$

$$f(t) = 0,0004875$$

- b. Perhitungan nilai Reliability  $R(t)$  untuk fresh water cooler pada  $t = 500$  jam :

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

$$R(t) = 0,1108$$

Sehingga nilai Unreliability  $Q(t)$  fresh water cooler diperoleh :

$$Q(t) = 1 - R(t) = 0,889$$

- c. Perhitungan MTTF untuk fresh water cooler :

$$MTTF = \frac{1}{\lambda} = 227.27 \text{ jam}$$

### 4.2.2.6. Lubricating Oil Cooler

1. Analisa grafik untuk Lubricating oil cooler :

- a. Dari grafik unreliability, gb. C.3a. dapat dilihat bahwa untuk LO cooler mempunyai probabilitas kegagalan (ketakandalan) semakin menurun dalam rentang waktu 0 sampai 700 jam operasi, sedangkan memasuki 700 jam operasi nilai ketakandalannya semakin turun.
- b. Grafik reliability, gb. C.3b. menunjukkan bahwa nilai keandalan LO cooler mendekati 1 pada saat pengoperasian 0 jam (komponen belum dioperasikan). Kemudian setelah beroperasi nilai keandalannya menurun hingga akan mencapai nilai keandalan jika pengoperasian melebihi 1000 jam operasi.
- c. Grafik failure rate oil filter, gb. C.3c. memperlihatkan bahwa laju kegagalan LO cooler adalah konstan pada 0.0020, sesuai karakteristik distribusi eksponensial.
- d. Grafik Probability Density Function untuk LO cooler, gb. C.3d. menunjukkan bahwa LO cooler akan mengalami kegagalan pada waktu cenderung menurun dalam selang waktu 0 – 1000 jam operasi. Ini menggambarkan periode burn-in dalam bath-up curve (komponen dalam kondisi belum mengalami kegagalan).

## 2. Perhitungan parameter-parameter keandalan

Berdasarkan hasil pengujian dengan sofware Weibull ++ diperoleh parameter-parameter distribusi eksponensial sebagai berikut :

$$\lambda = 0.0020$$

$$\gamma = 0 \text{ jam}$$

- a. Perhitungan Probability Density Function untuk LO cooler pada  $t = 500$  jam

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$$

$$f(t) = 0,0020e^{-0,0020(500)}$$

$$f(t) = 0.0007358$$

- b. Perhitungan nilai Reliability  $R(t)$  untuk LO cooler pada  $t = 500$  jam :

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

$$R(t) = 0.3678$$

Sehingga nilai Unreliability  $Q(t)$  LO cooler diperoleh :

$$Q(t) = 1 - R(t) = 0,6322$$

- c. Perhitungan MTTF untuk LO cooler :

$$MTTF = \frac{1}{\lambda} = 500 \text{ jam}$$

#### 4.2.2.7. Intercooler

1. Analisa grafik untuk intercooler :

- a. Dari grafik unreliability, gb. C.5a. dapat dilihat bahwa untuk intercooler mempunyai probabilitas kegagalan (ketakandalan) semakin menurun seiring bertambahnya waktu dan memiliki nilai ketakandalan mendekati 100% pada saat 480 jam operasi, sedangkan memasuki 570 jam operasi nilai ketakandalannya semakin turun.
- b. Grafik reliability, gb. C.5b. menunjukkan bahwa nilai keandalan intercooler mendekati 1 pada saat pengoperasian 0 – 488 jam. Kemudian setelah 488

jam operasi nilai keandalannya menurun hingga akan mencapai nilai keandalan jika pengoperasian melebihi 540 jam operasi.

- c. Grafik failure rate oil filter, gb. C.5c. memperlihatkan bahwa laju kegagalan intercooler adalah konstan pada 0.0889, sesuai karakteristik distribusi eksponensial.
- d. Grafik Probability Density Function untuk intercooler, gb.C.5d. menunjukkan bahwa intercooler akan mengalami kegagalan pada waktu cenderung menurun dalam selang waktu 0 – 540 jam operasi. Ini menggambarkan periode burn-in dalam bath-up curve (komponen dalam kondisi belum mengalami kegagalan). Setelah 540 jam operasi failure ratenya konstan.

## 2. Perhitungan parameter-parameter keandalan

Berdasarkan hasil pengujian dengan sofware Weibull ++ diperoleh parameter-parameter distribusi eksponensial sebagai berikut :

$$\lambda = 0.0889$$

$$\gamma = 488 \text{ jam}$$

- a. Perhitungan Probability Density Function untuk intercooler pada  $t = 500$  jam

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$$

$$f(t) = 0,0889e^{-0,0889(500)}$$

$$f(t) = 4.4107E - 21$$

- b. Perhitungan nilai Reliability  $R(t)$  untuk intercooler pada  $t = 500$  jam :

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

$$R(t) = 4.9615E - 20$$

Sehingga nilai Unreliability  $Q(t)$  intercooler diperoleh :

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

c. Perhitungan MTTF untuk intercooler :

$$MTTF = \frac{1}{\lambda} = 11.25 \text{ jam}$$

#### 4.2.2.8. Pipa Pendingin Sea Water

1. Analisa grafik untuk pipa pendingin sea water :

- a. Dari grafik unreliability, gb. C.7a. dapat dilihat bahwa untuk pipa pendingin sea water mempunyai probabilitas kegagalan (ketakandalan) semakin menurun seiring bertambahnya waktu dan memiliki nilai ketakandalan mendekati 100% pada saat 780 jam operasi, sedangkan memasuki 2000 jam operasi nilai ketakandalannya semakin turun.
- b. Grafik reliability, gb. C.7b. menunjukkan bahwa nilai keandalan pipa pendingin sea water mendekati 1 pada saat pengoperasian 0 – 750 jam. Kemudian setelah 750 jam operasi nilai keandalannya menurun hingga akan mencapai nilai keandalan jika pengoperasian melebihi 1625 jam operasi.
- c. Grafik failure rate oil filter, gb. C.7c. memperlihatkan bahwa laju kegagalan pipa pendingin sea water adalah konstan pada 0.0056, sesuai karakteristik distribusi eksponensial.

d. Grafik Probability Density Function untuk pipa pendingin sea water, gb.

C.7d. menunjukkan bahwa pipa pendingin sea water akan mengalami kegagalan pada waktu cenderung menurun dalam selang waktu 0 – 1500 jam operasi. Ini menggambarkan periode burn-in dalam bath-up curve (komponen dalam kondisi belum mengalami kegagalan). Setelah 1500 jam operasi failure ratenya konstan.

## 2. Perhitungan parameter-parameter keandalan

Berdasarkan hasil pengujian dengan sofware Weibull ++ diperoleh parameter-parameter distribusi eksponensial sebagai berikut :

$$\lambda = 0.0056$$

$$\gamma = 750 \text{ jam}$$

a. Perhitungan Probability Density Function untuk pipa pendingin sea water pada  $t = 500$  jam

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$$

$$f(t) = 0,0056e^{-0,0056(500)}$$

$$f(t) = 0.0003405$$

b. Perhitungan nilai Reliability  $R(t)$  untuk pipa pendingin sea water pada  $t = 500$  jam :

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

$$R(t) = 0.0608$$

Sehingga nilai Unreliability  $Q(t)$  pipa pendingin sea water diperoleh :

$$Q(t) = 1 - R(t) = 0.9392$$

- c. Perhitungan MTTF untuk pipa pendingin sea water :

$$MTTF = \frac{1}{\lambda} = 178.6 \text{ jam}$$

#### 4.2.2.9. Turbocharger

1. Analisa grafik untuk turbocharge :

- a. Dari grafik unreliability, gb. C.8a. dapat dilihat bahwa untuk turbocharge mempunyai probabilitas kegagalan (ketakandalan) semakin menurun seiring bertambahnya waktu dan memiliki nilai ketakandalan mendekati 100% pada saat 225 jam operasi, sedangkan memasuki 300 jam operasi nilai ketakandalannya semakin turun.
- b. Grafik reliability, gb. C.8b. menunjukkan bahwa nilai keandalan turbocharge mendekati 1 pada saat pengoperasian 0 – 222 jam. Kemudian setelah 222 jam operasi nilai keandalannya menurun hingga akan mencapai nilai keandalan jika pengoperasian melebihi 361 jam operasi.
- c. Grafik failure rate oil filter, gb. C.8c. memperlihatkan bahwa laju kegagalan turbocharge adalah konstan pada 0.0403, sesuai karakteristik distribusi eksponensial.
- d. Grafik Probability Density Function untuk turbocharge, gb. C.8d. menunjukkan bahwa turbocharge akan mengalami kegagalan pada waktu cenderung menurun dalam selang waktu 0 – 361 jam operasi. Ini menggambarkan periode burn-in dalam bath-up curve (komponen dalam

kondisi belum mengalami kegagalan). Setelah 361 jam operasi failure ratenya konstan.

## 2. Perhitungan parameter-parameter keandalan

Berdasarkan hasil pengujian dengan sofware Weibull ++ diperoleh parameter-parameter distribusi eksponensial sebagai berikut :

$$\lambda = 0.0403$$

$$\gamma = 222 \text{ jam}$$

- a. Perhitungan Probability Density Function untuk turbocharge pada  $t = 500$  jam

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$$

$$f(t) = 0,0403e^{-0,0403(500)}$$

$$f(t) = 7.1494E - 11$$

- b. Perhitungan nilai Reliability  $R(t)$  untuk turbocharge pada  $t = 500$  jam :

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

$$R(t) = 1.774E - 09$$

Sehingga nilai Unreliability  $Q(t)$  turbocharge diperoleh :

$$Q(t) = 1 - R(t) = 0.9999$$

- c. Perhitungan MTTF untuk turbocharge :

$$MTTF = \frac{1}{\lambda} = 24.8 \text{ jam}$$

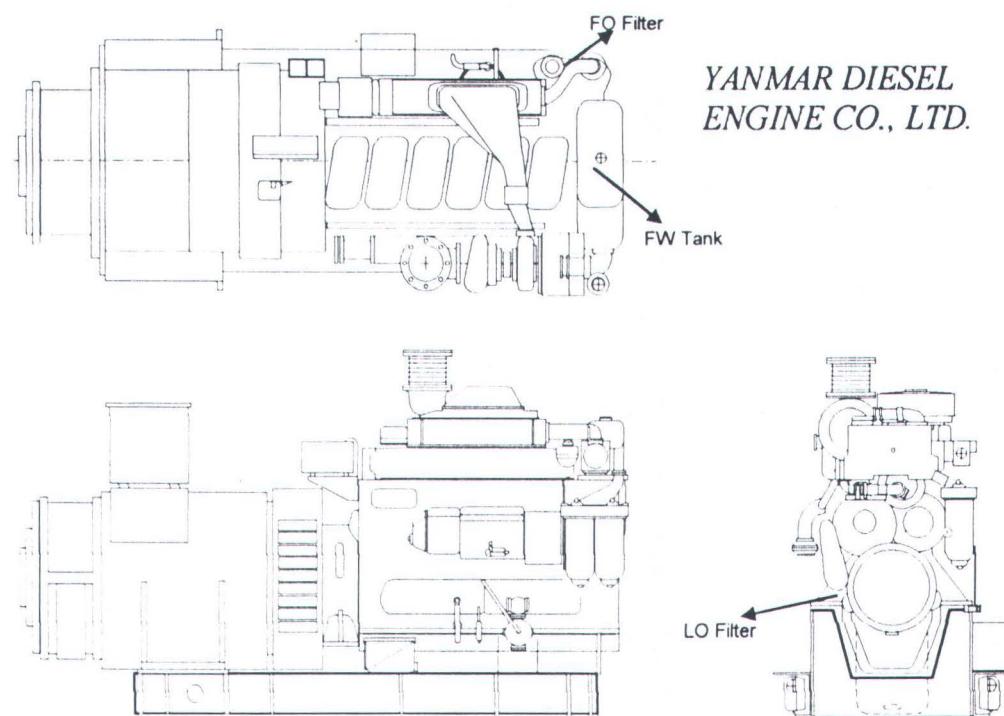
### 4.3. Pemodelan Markov

#### 4.3.1. Reliability Blok Diagram System

Prinsip kerja dari diesel generator :

Pada low speed diesel generator ini, generatorenya dikopel langsung dengan engine. Type generator dengan dua bearing dengan rotor fleksibel dikopel ke crankshaft engine, atau hanya mempunyai front bearing dengan rear shaft end yang dikopel kaku pada dan disupport oleh diesel engine crankshaft. Diesel generator empat langkah ini dilengkapi dengan turbocharger untuk meningkatkan engine output dan menjaga fuel tetap ekonomis.

Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar 4.5.



Gambar 4.5.  
Skema Diesel generator

Berdasarkan pengoperasian komponen diesel generator yang dianalisa, maka dapat dibuat reliability blok diagramnya sebagai berikut :



Dimana : A = FO system

B = LO system

C = Cooling system

D = Auxiliary engine

E = Generator

Blok diagram reliability untuk diesel generator berupa series blok diagram, artinya sistem hanya dapat beroperasi jika semua sistem pendukung berada dalam keadaan up (beroperasi), dengan kata lain jika salah satu sistem down (gagal beroperasi) maka sistem tidak bisa beroperasi.

#### 4.3.2. Pengkonstruksian State Space Diagram

Pengkonstruksian state space diagram diesel generator dilakukan berdasarkan jumlah sistem yang telah ditentukan diatas, meliputi sistem bahan bakar, sistem pelumasan, sistem pendingin, diesel (motor bantu) serta generator. Jumlah dari state dalam state space diagram akan bertambah seiring dengan bertambahnya komponen dalam sistem. Jika semua state ditunjukkan, maka jumlah state dalam diagram adalah  $2^n$ , dimana n adalah banyaknya komponen sistem. Karena untuk generator tidak pernah mengalami kegagalan, maka sistem ini dapat diabaikan, sehingga jumlah sistem yang dimodelkan menjadi 4 sistem.

Sehingga jumlah state dari diesel generator yang dimodelkan dalam state space diagram ini =  $2^4 = 16$  state.

Pengkonstruksian state space diagram harus disertai dengan parameter transition rate, yang meliputi failure rate sistem ( $\lambda$ ) dan repair rate ( $\mu$ ). Data failure rate sistem dapat dilihat pada tabel 4.3, sedangkan data repair dan lama repair sistem didapat dari wawancara langsung di lapangan. Hasil wawancara dapat dilihat pada tabel 4.4.

Tabel. 4.4. Hasil wawancara frekuensi perbaikan (repair) sistem

No.	SYSTEM	FREKUENSI REPAIR PER tahun	LAMA REPAIR
1	FO System	2 - 4 kali	3 - 5 hari
2	LO System	2 - 5 kali	3 - 5 hari
3	Cooling System	2 - 5 kali	4 hari
4	Auxiliary Engine	2 - 3 kali	3 - 4 hari

Apabila data ferekuensi repair dari lapangan sudah didapatkan maka laju perbaikan (repair rate) dari masing-masing sistem bisa ditentukan. Hasil perhitungan repair rate sistem dapat dilihat pada tabel 4.5.

Tabel 4.5. Hasil perhitungan Repair rate sistem

No.	SYSTEM	REPAIR RATE r/hours
1	FO System	0,14016
2	LO System	0,17520
3	Cooling System	0,17520
4	Auxiliary Engine	0,10512

Data failure rate dan repair rate ini selanjutnya dipakai dalam menghitung probabilitas transition rate pada matrix dengan bantuan software Matlab.

Hasil pengkonstruksian state space diagram diesel generator dapat dilihat pada lampiran D.

#### 4.3.3. Stochastic Transitional Probability (STP) Matrix

Stochastic Transitional Probability (STP) Matrix merupakan penyelesaian dari state space diagram. Perhitungan probabilitas transisi dari matrik dibantu dengan software Matlab. Ordo matrik ditentukan oleh banyaknya state dalam state space diagram. Pada diesel generator ini ordo matrik =  $16 \times 16$ .

Perhitungan probabilitas dilakukan berdasarkan konsep *limiting state probability*, yang mana konsep ini mendefinisikan  $\alpha$  sebagai vektor limiting state probability atau dapat dinyatakan :

$$\alpha P = \alpha$$

dimana :  $\alpha = [P_1 \ P_2 \ P_3 \dots \ P_{16}]$

$P$  = Stochastic Transitional Probability Matrix (STP Matrix)

STP Matrix, bentuk persamaan limiting state probability dan hasil perhitungan probabilitasnya dengan software matlab dapat dilihat pada lampiran E.

#### 4.3.4. Perhitungan Availability Diesel Generator

Perhitungan nilai ketersediaan (*availability*) diesel generator, dilakukan berdasarkan hasil perhitungan probabilitas state. Pada diesel generator ini sistem-sistemnya tersusun series, sehingga state 1 merupakan up state sedangkan state 2,

3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15 dan 16 merupakan down state. Untuk sistem yang tersusun series availability sistemnya merupakan probabilitas state yang up atau diformulasikan :

$$\text{availability, } A = P_1$$

dimana hasil perhitungan Probabilitas tiap state oleh software matlab didapatkan :

$$P_1 = 0.9220 \quad P_9 = 0.0007$$

$$P_2 = 0.0148 \quad P_{10} = 0.0003$$

$$P_3 = 0.0348 \quad P_{11} = 0.0002$$

$$P_4 = 0.0177 \quad P_{12} = 0$$

$$P_5 = 0.0085 \quad P_{13} = 0$$

$$P_6 = 0.0006 \quad P_{14} = 0$$

$$P_7 = 0.0003 \quad P_{15} = 0$$

$$P_8 = 0.0001 \quad P_{16} = 0$$

Sehingga availability sistem,  $A = P_1 = 0.9220$

sedangkan unavailability sistem,  $U = 1 - A = 0.078$

Jadi berdasarkan nilai availability dan unavailabilitynya dapat disimpulkan bahwa peluang ketersediaan diesel generator untuk berfungsi di masa yang akan datang cukup bagus (*available*), karena mendekati 1 sehingga produktivitas sistem dapat diandalkan, sedangkan untuk lebih memperkecil lagi nilai ketidaktersediaan sistem diperlukan waktu penyediaan komponen sistem yang lebih cepat lagi.

#### 4.4. Pemodelan Maintenance Cost

Pemodelan perawatan dilakukan untuk mendapatkan nilai total biaya yang diharapkan (*expected total cost*) dari sistem. Sebelum dimodelkan maka ditentukan beberapa asumsi sebagai berikut :

- a. Diesel generator dimodelkan ke dalam ‘one-engine system’ karena perubahan dari sistem state mengikuti proses Markov.
- b. Repair dan replacement cost,  $C_{ir}$ , diasumsikan dengan formula :

$$C_{ir} = Y_i l_i + b_i ,$$

dimana  $Y_i$  adalah repair/replacement cost per unit waktu,  $b_i$  adalah fixed repair/replacement cost,  $l_i$  adalah waktu yang diperlukan untuk repair/replacement komponen i.

$Y_i$  berhubungan dengan opportunity dan repair/replacement crew cost, dimana  $b_i$  berhubungan dengan fixed repair/replacement cost, seperti biaya transportasi membawa crew repair/replacement menuju kapal, sejalan dengan biaya material untuk repair/replacement komponen i.

##### 4.4.1. Pemodelan untuk ‘one-engine system’

Diasumsikan bahwa sebuah one-engine system mempunyai  $N + 1$  state, yang didefinisikan bahwa sistem terdiri dari satu state ‘up’ yang didefinisikan = 0 dan sebanyak  $N$  state ‘down’. Jika komponen i dari engine gagal, maka engine ini akan bertransisi ke state di bawahnya (state  $i = 1, 2, 3, \dots, N$ ). Diesel engine akan segera berhenti beroperasi apabila terdapat kegagalan pada komponennya dan

tidak bisa beroperasi sampai diesel engine tersebut dikembalikan ke keadaan beroperasi seperti semula.

Pada  $t=0$ , engine mulai beroperasi lagi, masing-masing down state menghubungkan kegagalan dari one-engine komponen.

Pada  $t=T_0$ , dengan mengacu pada akhir pengoperasian sistem, maka dapat ditentukan 2 asumsi dibawah ini :

Asumsi I : Diesel engine berada di state 0 selama interval  $(0, T_0)$ , misalnya diesel engine tidak pernah mengalami kegagalan selama beroperasi.

Asumsi II : Diesel engine pernah gagal sedikitnya pada satu state transisi selama  $(0, T_0)$ , misalnya sistem gagal pada waktu  $\varepsilon$ ,  $\varepsilon \in (0, T_0)$  dimana  $\varepsilon$  = variabel random.

Jika variabel-variabel cost yang mempengaruhi maintenance cost diesel generator didefinisikan sebagai berikut :

- Expected total cost terdiri dari biaya operasi diesel generator saat tidak pernah terjadi kegagalan dan saat pernah terjadi kegagalan.
- Operating cost, adalah cost pada saat diesel generator tidak pernah gagal.
- Terminal cost, adalah cost yang terjadi pada saat diesel generator belum beroperasi.
- Fixed cost untuk repair/replacement, merupakan biaya transportasi crew pada saat repair/replacement sesuai jumlah crew
- Waktu yang diperlukan untuk transisi dari keadaan up menuju keadaan down.
- Waktu yang diperlukan untuk repair/replacement.

Didefinisikan  $\vartheta_o(t)$  sebagai nilai total cost yang diharapkan (*expected total cost*) selama sistem beroperasi sepanjang  $t$  (dengan batas engine hours). Mengacu pada proses-proses pemodelan Markov, maka expected total cost dari sistem dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\begin{aligned}\vartheta_o(t) &= \sum_{j=1}^N P_j R_j(t) [y_o t + \vartheta_o(0)] \\ &+ \sum_{j=1}^N P_j \int_0^t d\vartheta_j(\varepsilon) [y_o \varepsilon + b_j + y_j l_j + \vartheta_o(t - \varepsilon - l_j)] \text{ untuk } t > l_j\end{aligned}\quad (4.1)$$

Pada boundary condition, untuk  $0 \leq t < l_j$  :

$$\begin{aligned}\vartheta_o(t) &= \sum_{j=1}^N P_j R_j(t) [y_o t + \vartheta_o(0)] \\ &+ \sum_{j=1}^N P_j \int_0^t d\vartheta_j(\varepsilon) [y_o \varepsilon + b_j + y_j (t - \varepsilon) + \vartheta_o(0) + (l_j - t + \varepsilon) y'_j]\end{aligned}\quad (4.2)$$

dimana :  $\vartheta_o(t)$  = Expected total cost one-engine system pada waktu  $t$  (\$)

$P_j$  = Probabilitas transisi komponen menuju down state  $j$

$R_j$  = Reliability dari komponen  $j$

$y_o t$  = Constant operating cost system per unit waktu (\$/hours)

$\vartheta_o(0)$  = Terminal cost system pada saat menempati state 0 pada waktu  
To (\$)

$f_j$  = Waktu yang diperlukan sistem untuk melakukan transisi menuju  
down state  $j$

$y_o(\varepsilon)$  = Operating cost pada waktu  $\varepsilon$

$b_j$  = fixed cost yang terjadi setelah komponen  $j$  gagal (\$)

$y_j$  = Opportunity dan repair/replacement cost per unit waktu dari komponen j (\$/hours), untuk  $t < 0$ ,  $\vartheta(t) = 0$

$l_j$  = waktu untuk repair atau replacement komponen j (hours)

$y'_j$  = Repair cost per unit waktu selama sistem berada pada state yang gagal (\$/hours)

Komponen persamaan pertama dalam persamaan (4.1) dan (4.2) diatas adalah expected cost untuk asumsi I, selama tidak terjadi kegagalan dalam operasinya, cost yang ada hanya operating cost,  $y_0 t$ . Pada akhir pengoperasian diesel engine terdapat terminal cost,  $\vartheta_0(0)$ .

Komponen persamaan kedua dalam persamaan (4.1) dan (4.2) adalah expected cost untuk asumsi II, dimana diesel engine dioperasikan untuk  $\varepsilon$  unit waktu, selain operating cost,  $y_0(\varepsilon)$  jika pada waktu  $\varepsilon$  komponen j gagal maka timbul fixed cost  $b_j$  dan variabel cost  $y_j$ , yang mana variabel cost ini meliputi opportunity cost dan repair (atau replacement) cost.

Persamaan (4.1) dan (4.2) bisa diselesaikan secara berulang, dimulai dengan  $t=0$  dan menambah  $t$  dengan  $\Delta t$  sampai mencapai  $t=T_0$ .

#### 4.4.2. Perhitungan Maintenance Cost

Perhitungan maintenance cost dilakukan berdasarkan hasil pemodelan perawatan diesel generator diatas. Asumsi-asumsi yang dipakai yaitu :

1. Diesel generator berada di state I (tidak pernah mengalami kegagalan selama beroperasi pada  $T_0 = 24$  jam).

2. Diesel generator pernah mengalami kegagalan pada satu state pada  $T = 1000$  jam
3. Constan operating cost untuk  $T_0=24$  jam diasumsikan 1 unit cost, sehingga untuk 1 jam constan operatingnya =  $1/24$  unit cost. Pada  $T=1000$  jam operating costnya=42 unit cost.
4. Terminal cost diesel generator diasumsikan = 0, karena sistem (diesel generator beroperasi secara terus-menerus selama kapal beroperasi juga.
5. Waktu yang diperlukan untuk transisi = 2 jam
6. Untuk fixed cost, opportunity dan repair/replacement cost diasumsikan sama, yaitu  $\frac{1}{4}$  dari constan operating cost
7. Waktu untuk repair atau replacement sistem = 120 jam

Sehingga dari asumsi-asumsi tersebut secara empiris dapat dikalkulasi dari persamaan pemodelan perawatan untuk  $0 < T_0 < l_j$  :

$$\begin{aligned} \vartheta_o(t) &= \sum_{j=1}^N P_j R_j(t) [y_o t + \vartheta_o(0)] \\ &\quad + \sum_{j=1}^N P_j \int_0^t d\vartheta f_j(\varepsilon) [y_o \varepsilon + b_j + y_j(t-\varepsilon) + \vartheta(0) + (l_j - t + \varepsilon)y'_j] \end{aligned}$$

dimana diketahui :

$$T_0 = 24 \text{ jam}$$

$$\varepsilon = 1000 \text{ jam}$$

$$P(j) = 0.0625$$

$$R(t) = 0.72827$$

$$y_o t = 1/24 \text{ unit cost} = 0.04167 \text{ unit cost/jam}$$

$$\vartheta_o(0) = 0$$

$$f_j = 2 \text{ jam}$$

$$y_0(\varepsilon) = 42 \text{ unit cost/jam}$$

$$b_j = \frac{1}{4} \times y_0 t = \frac{1}{4} \times 0.04167 = 0.01042 \text{ unit cost/jam}$$

$$y_j = \frac{1}{4} \times y_0 t = \frac{1}{4} \times 0.04167 = 0.01042 \text{ unit cost/jam}$$

$$l_j = 120 \text{ jam}$$

$$y'_j = \frac{1}{4} \times y_0 t = \frac{1}{4} \times 0.04167 = 0.01042 \text{ unit cost/jam}$$

Sehingga perhitungan expected total cost,  $\theta(t)$  diesel generator pada saat terjadi kegagalan operasi pada  $t = 1000$  jam adalah :

$$\theta(t) = 0.0625(0.72827)[0.04167 + 0] +$$

$$[42 + 0.01042 + 0.01042(24 - 1000) + 0 + (120 - 24 + 1000)0.01042]$$

$$\theta(t) = 0.00189 + 43.26082$$

$$= 43.26272 = 43.3 \text{ unit cost / jam}$$

Jadi expected total cost untuk maintenance diesel generator adalah 43.3 unit cost/jam.

#### 4.5. Diskusi

Analisa data kegagalan dari maintenance record diesel generator menunjukkan terdapat 16 komponen diesel generator mengalami kegagalan pengoperasian dalam periode maintenance selama 4 tahun (1997 – 2001). Dari 16 komponen tersebut, dipilih komponen yang mempunyai frekuensi kegagalan lebih dari 3 kali untuk dimodelkan kegagalannya dan didapatkan 9 komponen, yaitu Fuel oil filter, nozzle injector, lubricating oil filter, lubricating oil carter, fresh water cooler, lubricating oil cooler, intercooler, pipa pendingin sea water dan

turbocharger. Hasil pemodelan dengan komponen software Weibull ++ menunjukkan bahwa komponen-komponen tersebut mempunyai laju kegagalan (*failure rate*) yang konstan, artinya komponen tersebut tergolong komponen yang mampu-rawat (*repairable*) atau dalam bathup diagram termasuk ke dalam *usefull-life period*. Sehingga diesel generator memenuhi persyaratan untuk pemodelan Markov.

Hasil pemodelan Markov berdasarkan jumlah sistem dalam diesel generator, yaitu fuel oil sistem, lubricating oil sistem, cooling sistem dan auxiliary engine menghasilkan 16 jumlah state yang dikonstruksikan dalam state space diagram. Probabilitas transisi sistem dievaluasi dengan limiting state probability menghasilkan nilai ketersediaan sistem (*availability*) sebesar 0,9220 dan nilai ketidaktersediaan (*unavailability*) sistem sebesar 0,078. Ini menunjukkan bahwa peluang ketersediaan diesel generator untuk berfungsi di masa yang akan datang cukup baik (*available*) atau produktivitas sistem dapat diandalkan dan untuk memperkecil nilai ketidaktersediaan sistem diperlukan waktu penyediaan komponen yang lebih cepat, jika komponen perlu diganti atau waktu perbaikan yang lebih singkat jika komponen perlu diperbaiki.

Perhitungan maintenance cost diesel generator menghasilkan maintenance cost menghasilkan expected total cost sebesar 43.3 unit cost/jam, yang mana expected total cost ini terdiri dari biaya operasi pada saat diesel generator tidak mengalami kegagalan ( $t=24$  jam) dan biaya operasi pada saat diesel generator pernah mengalami kegagalan ( $t=1000$  jam). Operating cost pada saat sistem tidak mengalami kegagalan biasanya nilainya konstan dan untuk series sistem ini pada

proses Markov berada di state 1, yang mana semua sistem dalam state ini dalam keadaan up. Sedangkan operating cost pada saat diesel generator mengalami kegagalan ( $t=1000$  jam) biaya ini terdiri dari antara lain biaya untuk repair/replacement komponen, biaya transportasi crew repair menuju ke kapal dengan mempertimbangkan juga lamanya waktu repair atau replacement komponen dan biaya material.

**BAB V**

**KESIMPULAN DAN SARAN**

*Multi Jasa*



## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisa pada diesel generator kapal di PT. Pelayaran Meratus ini, dapat dibuat beberapa kesimpulan yaitu :

1. Pada analisa laju kegagalan (*failure rate*) komponen per hari, Lubricating Oil Sistem mempunyai nilai failure tertinggi, yaitu sebesar 0.00662, artinya dalam beroperasinya sistem sering mengalami down sehingga komponen sistem sering mengalami repair dan replacement oleh karena itu diperlukan perhatian khusus terhadap periode maintenance komponen-komponennya.
2. Pemodelan Markov pada diesel generator ini menghasilkan nilai ketersediaan sistem (*availability*) sebesar 0.9220, artinya peluang ketersediaan diesel generator untuk berfungsi dengan baik di waktu yang akan datang cukup baik (*available*) dan produktivitas sistem bisa diandalkan. Alternatif untuk memperkecil nilai ketidaktersediaan sistem dapat dilakukan dengan mempercepat waktu penyediaan komponen-komponen diesel generator.
3. Metode Markov dapat digunakan sebagai dasar analisa biaya perawatan (*maintenance cost*) diesel generator dengan cara membuat pemodelan biaya perawatan sistem terlebih dahulu, dari hasil perhitungan didapatkan

expected total cost untuk maintenance diesel generator sebesar 43.3 unit cost/jam, dimana biaya ini terdiri biaya operasi (*operating cost*) pada saat diesel generator tidak mengalami kegagalan ( $t=24$  jam) dan biaya operasi pada saat diesel generator mengalami kegagalan ( $t=1000$  jam). Sedangkan variabel-variabel penting yang mempengaruhi besarnya maintenance cost adalah repair atau replacement cost per unit waktu, biaya transportasi untuk membawa sejumlah crew repair/replacement menuju ke kapal dan lamanya waktu yang diperlukan untuk repair/replacement komponen.

## 5.2. Saran-saran

Pendekatan metode Markov sebagai salah satu konsep reliability engineering sebaiknya digunakan untuk menganalisa biaya perawatan (*maintenance cost*) suatu sistem engineering sehingga dapat ditentukan strategi maintenance yang lebih baik untuk meminimalkan biaya perawatan sistem di masa yang akan datang.

Pemodelan Markov sebaiknya digunakan untuk komponen atau sistem yang mempunyai laju kegagalan (*failure rate*) yang konstan, karena apabila komponen atau sistem tidak mempunyai laju kegagalan yang konstan maka komponen atau sistem tersebut dikatakan tidak homogen atau stasioner, sedangkan syarat pemodelan Markov, perilaku komponen atau sistem harus sama pada semua titik waktu yang dipertimbangkan (stasioner).

**DAFTAR PUSTAKA**

## **DAFTAR PUSTAKA**

Bahadir Inozu [1990],"Reliability and Replacement Analysis of Great Lakes Marine Diesels", The University of Michigan.

Charles E. Ebeling [1997],"An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering", University of Dayton, The McGraw-Hill Companies, inc.

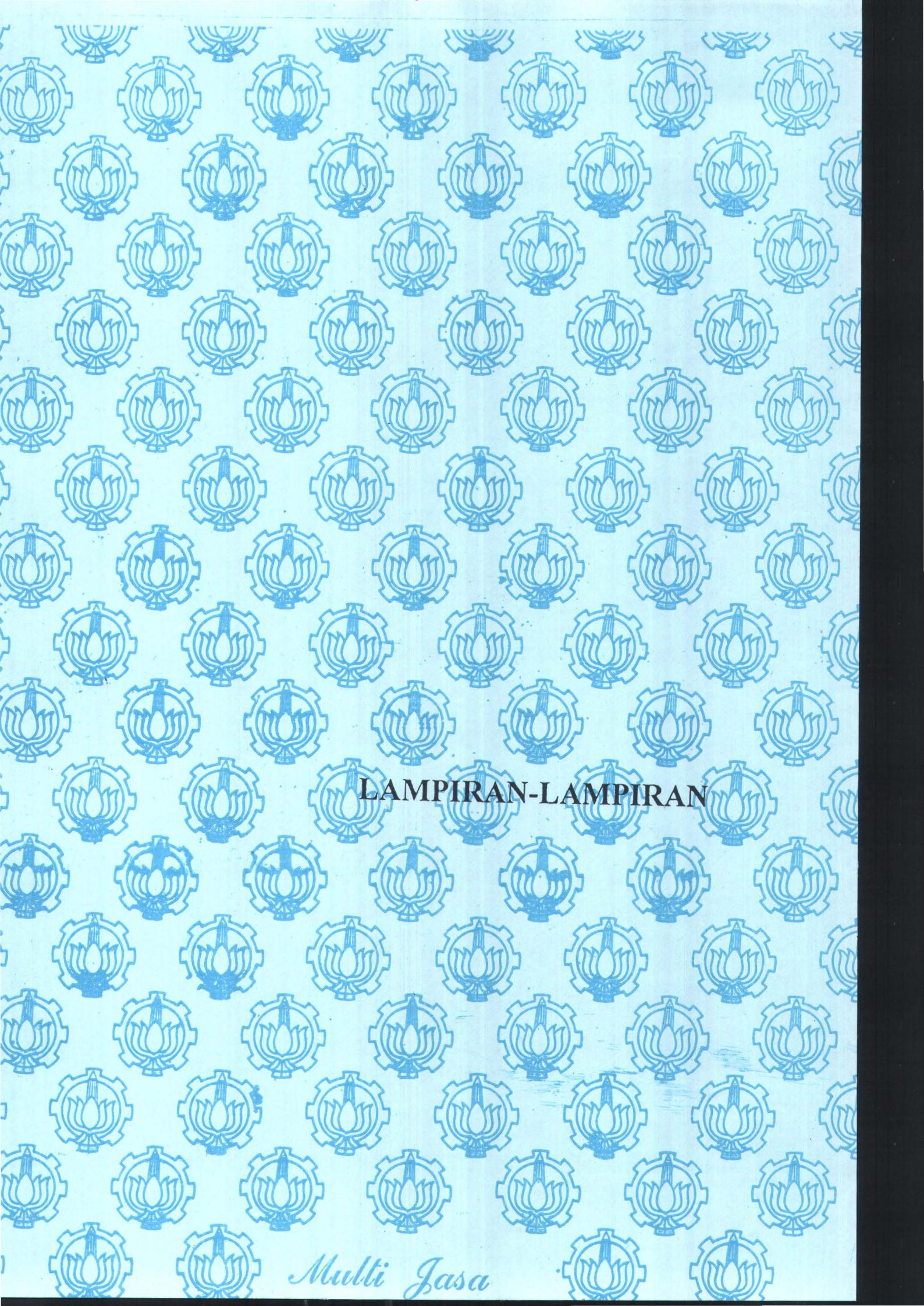
Ir. Dwi Priyanta,"Reliability E-Book", System Reliability and Safety Software.

J.I. Ansell and M.J. Phillips [1994],"Practical Methods for Reliability Data Analysis", Clarendon Press, Oxford.

Roger D. Leitch [1995],"Reliability Analysis for Engineering",Oxford University Press, New York.

Roy Billiton & Ronald N. Allan [1992],"Reliability Evaluation of Engineering Systems", Plenum Press, New York and London.

Roy L. Harrington [1992],"Marine Engineering", Newport News Ship Building, The Society of Naval Architect and Marine Engineers, 601 Pavonia Avenue, Jersey City, N.J. 07306.



LAMPIRAN-LAMPIRAN

Multi Jasa



JURUSAN TEKNIK SISTEM PERKAPALAN  
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
KAMPUS ITS KEPUTIH SUKOLILO SURABAYA 60111  
TELP. 5994754 – 55 PES 1102 FAX 5994754

## SURAT KEPUTUSAN PENGERJAAN TUGAS AKHIR KS 1701

Sebagai salah satu syarat untuk mendapatkan gelar Sarjana Teknik pada Jurusan Teknik Sistem Perkapalan Fakultas Teknologi Kelautan ITS, maka perlu diterbitkan Surat Keputusan Pengerjaan Tugas Akhir yang memberikan tugas kepada mahasiswa tersebut di bawah ini untuk mengerjakan Tugas sesuai judul dan lingkup bahasan yang telah ditentukan.

Nama Mahasiswa : Aulia Windyandari  
Nrp : 42 99 109 513  
Dosen Pembimbing : 1. Ir. Dwi Priyanta, M.SE.  
                       2. Lahar Baliwangi, ST, M.Eng.  
Tanggal diberikan tugas : 09 Maret 2001  
Tanggal diselesaikan tugas : September 2001  
Judul Tugas Akhir : ANALISA MAINTENANCE COST PADA DIESEL GENERATOR KAPAL DI PT. PELAYARAN MERATUS DENGAN PENDEKATAN METODE MARKOV

Surabaya,  
Ketua Jurusan Teknik Sistem Perkapalan  
FT. Kelautan ITS



DR .Ir. Agoes A. Masroeri . M. Eng  
NIP. 131 407 591

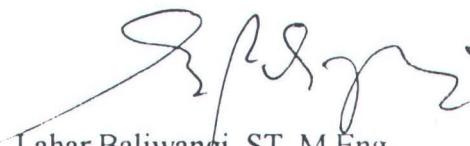
Surabaya,  
Yang menerima tugas :  
Mahasiswa

Dosen Pembimbing I,

Dosen Pembimbing II,

  
Ir. Dwi Priyanta, M. SE  
NIP. 132 085 805

  
Aulia Windyandari  
Nrp. 42 99 109 513

  
Lahar Baliwangi, ST, M. Eng.  
NIP. 131 133 979



JURUSAN TEKNIK SISTEM PERKAPALAN  
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA

Nama : Aulia Windyandari  
Nrp : 4299 109 513

## Judul Tugas Akhir :

#### **ANALISA MAINTENANCE**

## **“ANALISA MAINTENANCE COST PADA DIESEL GENERATOR KAPAL DI PT. PELAYARAN MERATUS DENGAN PENDEKATAN METODE MARKOV”**

No	Date	ASISTENSI	Signature
1	29/3/01	Asistensi Pengelolahan Data	Yan
2	6/4/01	Asistensi format	Yan
3	17/4/01	- - -	Yan
4	24/4/01	Bab 3	Yan
5	24/4/01	Bab 3	Yan
6	30/04/01	Bab 2	Yan
7	3/5/01	Bab 2	Yan
8	10/5/01	Bab 4 (Format Penulisan)	Yan
9	17/5/01	Data BAB IV (Sensor Kompr.)	Yan
10	13/6/01	Pengelompokan komponen	Yan
11	15/6/01	State Space Diagram	Yan
12	21/6/01	State Space Diagram	Yan
13	28/6/01	Transition Rate State Space Diagram	Yan
14	9/7/01	Perhitungan Matrix Probability	Yan
15	13/7/01	Perhitungan Matrix Probability	Yan
16	17/7/01	Perhitungan Matrix Probability	Yan
17	20/7/01	Pemodelan Perawatan	Yan
18	23/7/01	Pemodelan + Perhitungan Cost	Yan
19.	25/7/01	Kesimpulan (Bab 5) + Diskusi	Yan

Pembimbing I

Pembimbing II

Ir.Dwi Priyanta, MSE  
Nip.



## LEMBAR EVALUASI PRESENTASI PROPOSAL (P-1) TUGAS AKHIR

Setelah membaca, menimbang, dan mempelajari Presentasi Proposal Tugas Akhir yang dilaksanakan oleh:

Nama / NRP : Aulia Wind yaufdari / 4299 109 513  
Judul Proposal : Analisa Maintenance Cost Pada Diesel Generator Faopl  
di PT Pelayaran Meratus Dengan Pendekatan Metode MARRC

Maka Tim Dosen Penilai memutuskan mahasiswa tersebut diatas :

- ① *Menerima proposal tanpa perbaikan*
2. *Menerima proposal dengan perbaikan atau catatan*
3. *Menolak proposal.*

Dan menetapkan Dosen Pembimbing Tugas Akhir ybs adalah:

1. ir. Dwi Priyanta, MSc..... sebagai Dosen Pembimbing Utama
2. Lahar Bali Wangi, ST, MEng..... sebagai Dosen Pembimbing Pendamping

Hal-hal yang menjadi catatan pada penulisan Proposal Tugas Akhir tersebut adalah:  
(bila diperlukan dapat dilanjutkan pada halaman kosong dibalik)

Surabaya, 09/03/2001.....

Tim Dosen Penilai Presentasi Proposal Tugas Akhir,

1. Dr. Ir. AA Masroeri, MEng (Ketua Tim)
2. Ir. Asianto (Anggota)
3. Ir. Sardono Sarwono, MSc (Anggota)
4. Ir. Lahar Bali Wangi, MEng (Anggota)
5. Ir. Sujiro W.A. MSc (Anggota)
6. Ir. Dwi Priyanta, MSc (Anggota)
7. A.A. Bagus Dinar Iyana DP, ST

Tanda Tangan

1. 2.   
3. 4.   
5. 6.   
7.

Tanda tangan mahasiswa .....



## LEMBAR EVALUASI PRESENTASI INTERIM (P-2) TUGAS AKHIR

Setelah membaca, menimbang, dan mempelajari Presentasi Interim Tugas Akhir yang dilaksanakan oleh:

Nama / NRP : Aulia W / 99-513.

Judul Tugas Akhir : Analisa maintenance Cost pada Diesel Generator Kapal di PT Pelayaran Meratus &g. Pendekatan Metode Martov.

Dosen Pembimbing: 1. Ir. Dwi Priyanta, MSE.  
2. Lahar Baliwangi, ST, MEng.

Maka Tim Dosen Penilai memutuskan mahasiswa tersebut diatas :

- A. Langsung mengikuti Presentasi Akhir Istimewa (P-3+) pada tanggal .....
- B. Melanjutkan penulisan TA dan mengikuti Presentasi Akhir Reguler (P-3) pada tanggal .....
- C. Melanjutkan penulisan TA dan mengikuti Presentasi Interim (P-2) pada semester berikutnya.
- D. Membatalkan penulisan TA.

Hal-hal yang menjadi catatan pada penulisan Tugas Akhir tersebut adalah:  
(bila diperlukan dapat dilanjutkan pada halaman kosong dibalik)

- lebih intens ke dalam penul

Surabaya, ... 9 Mei 2001

Tim Dosen Penilai Presentasi Interim Tugas Akhir,

Tanda Tangan

- |                                  |             |
|----------------------------------|-------------|
| 1. Dr. Ir. AA. Macraeri, MEng    | (Ketua Tim) |
| 2. Ir. Sardono Sarwito, MSc      | (Anggota)   |
| 3. Ir. Ami Adjii, MM, MSc        | (Anggota)   |
| 4. Ir. Surjono W.A. DIPMARE, MSc | (Anggota)   |
| 5. Lahar Baliwangi, ST, MEng     | (Anggota)   |
| 6. Ir. Dwi Priyanta, MSE         | (Anggota)   |

1.....

3.....

5.....

Tanda tangan mahasiswa .....

**LAMPIRAN A**

**GENERAL DESKRIPTION OBJECT**

**PENELITIAN DAN SPECIFIKASI DIESEL**

**GENERATOR**

## GENERAL DISCRIPTION

## CARAKA JAYA NIAGA III - 17

<b>SHIP PARTICULAR MV. CARAKA JAYA NIAGA III-17</b>				<b>Ex-4</b>	<b>Rev. 0 (26/01/2001)</b>	
<b>GENERAL DISCRIPTION</b>						
Registry/Flag : Jakarta/Indonesia						
Call Sign: YEWU      Official No : -      IMO/Lloyd no : - / 7919779						
Class: BKI      Reg.No: 5236      Class No: -						
Class Notation: A 100 IP "Equipped for carriage of Container"						
Built(years/shipyards/no): 1993/PT. PAL Indonesia, Surabaya/102						
<b>PRINCIPAL DIMENSIONS</b>						
Loa: 98.00 m	Lbp: 92.80 m	B(mld): 16.50 m	Draft: 5.385 m			
H(mld): 7.80 m	Ballast draft: - m	Ballast air draft: - m	T(light): - m			
<b>TONNAGE</b>						
GT: 3,256 tons	NT: 1,647 tons	Displacement (S/T): 5,609/5,747 tons				
<b>MACHINERY'S</b>						
Engine	Main Engine	A/E PS	A/E CTR	A/E SB	A/E HBR	P. Pack, P-
Merk	<b>MITSUI MAN B&amp;W</b>	<b>Yanmar</b>	<b>Yanmar</b>	<b>Yanmar</b>		
Type	<b>5 S26 MC</b>	<b>6KIIL-STN</b>	<b>6KIIL-STN</b>	<b>6KIIL-STN</b>		
No/Year	<b>FMW 001/1991</b>	<b>0292/1991</b>	<b>0291/1991</b>	<b>0290/1991</b>		
Power/rpm	<b>2050HP/207</b>	<b>360/1500</b>	<b>360/1500</b>	<b>360/1500</b>		
Bore/stroke	<b>260/980</b>					
Generator		<b>Taiyo TWY310</b>	<b>Taiyo TWY310</b>	<b>Taiyo TWY310</b>		
KVA		<b>250</b>	<b>250</b>	<b>250</b>		
Volt/Hz/Am p		<b>380/50/370</b>	<b>380/50/370</b>	<b>380/50/370</b>		
Arrangement						
T/Charg e	Merk-type	No seri		Specification		
M/E	<b>MET 26 SR</b>	<b>5524</b>				
A/E PS						
A/E SB						

## GENERAL DESCRIPTION

## CARAKA JAYA NIAGA III - 24

SHIP PARTICULAR MV. CARAKA JAYA NIAGA III-24		Ex. -	Rev. 0 (26/01/2001)
<u>GENERAL DESCRIPTION</u>			
Registry/Flag : Jakarta/Indonesia			
Call Sign: YEZI      Official No : -      IMO/Lloyd no : - / -			
Class : BKI      Reg.No: 5306      Class No: -			
Class Notation: A 100 IP "Equipped for carriage of Container"			
Built(years/shipyard/no): 1993/PT. PAL Indonesia /114			
<u>PRINCIPAL DIMENSIONS</u>			
Loa: 98.00 m	Lbp: 92.150 m	B(mld): 16.50 m	Draft: 5.385 m
H(mld): 7.80 m	Ballast draft: - m	Ballast air draft: - m	T(light): - m
<u>TONNAGE</u>			
GT: 3,258 tons	NT: 1,603 tons	Displacement (S/T): 5,609/5,747 tons	
<u>DEADWEIGHT &amp; CAPACITIES</u>			
Deadweight (S/T): 3,668/3806 tons	Deadweight (winter): - tons	TPC: 11.53 tons	

MACHINERY'S						
Engine	Main Engine	A/E PS	A/E CTR	A/E SB	A/E HBR	P. Pack, P-
Merk	<b>MITSUI MAN B&amp;W</b>	Yanmar	Yanmar	Yanmar		
Type	<b>5 S26 MC</b>	<b>6KHL-STN</b>	<b>6KHL-STN</b>	<b>6KHL-STN</b>		
No/Year	PMW 005/1993	020611	020603	020602		
Power/rpm	<b>2050HP/207</b>	360/1500	360/1500	360/1500		
Bore/stroke	260/980					
Generator		Taiyo TWY310	Taiyo TWY310	Taiyo TWY310		
KVA		250	250	250		
Volt/Hz/Amp		380/50/370	380/50/370	380/50/370		
Arrangement						
T/Charge	Merk-type	No seri	Specification			
M/E	<b>MET 26 SR</b>	<b>5561</b>				
A/E PS						
A/E SB						

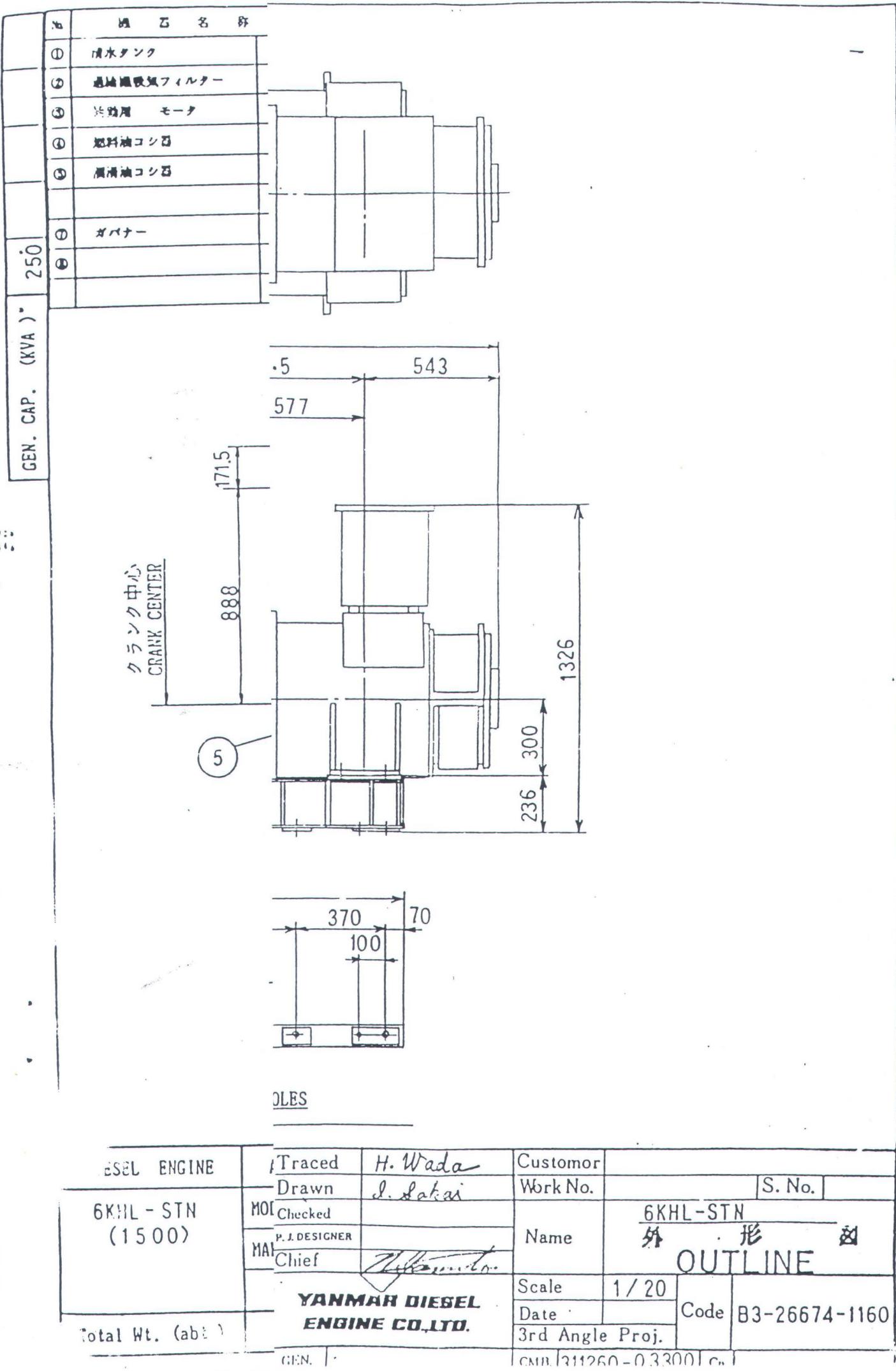
## PRINCIPAL DATA OF ENGINE

1. Type	-	Vertical, Single Acting 4 - Cycle Diesel Engine
2. Model	-	6KHL-STN
3. Rated Output	PS {KW}	360 { 265 }
4. Rated Revolution	rpm	1500
5. No. of Cylinder	-	6
6. Cylinder Arrangement	-	In - Line
7. Cylinder Bore	mm	135
8. Stroke	mm	160
9. Total Stroke Volume	l	13.741
10. Mean Effective Pressure	kg/cm <sup>2</sup> {Mpa}	15.72 {1.54}
11. Mean Piston Speed	m/sec.	8.00
12. Direction of Rotation	-	Crank shaft : Counter Clockwise (as viewed from Flywheel Side)
13. Dry Weight (Approx.)	kg	1300
14. Crank Arrangement	-	1,6
		2,5      3,4
15. Firing Order	-	1 - 4 - 2 - 6 - 3 - 5 - 1
16. Fuel Oil	-	Marine Diesel Fuel (viscosity of used fuel is between 32 and 65 seconds by REDWOOD No.1 at engine inlet)
17. Lubricating Oil	-	Engine System Oil : A.P.I. Service Grade CD Class

18. Starting System	-	• Starting System : Air Start by Air Motor 6.6 KW x 1 (at 8 kg/cm <sup>2</sup> Air)
19. Lubricating Oil Sump System	-	Wet Sump (Engine Oilpan)
20. Lubricating System	-	Forced Lubrication by the Engine Equipped Pump
21. Cooling System	-	• Cylinder, Cyl. Head & Exh. Manifold : Fresh Water • C.F.W. and L.O. and Air Cooler : Sea Water • Piston : Lub. Oil
22. Super Charging System	-	by Exhaust gas Turbo-Charger with Air Cooler
23. Turning System	-	Turning Bar
24. Over Load	-	10% Over Load : 60 min.
25. Specific Fuel Oil Consumption (⌘1)	g/PS·hr {g/KW·hr}	158 {215}
26. Specific L.O. Consumption (⌘2)	g/PS·hr {g/KW·hr}	≥ 0.6 {≥ 0.82}
27. Speed Variation	-	Momentary : within 10 % Permanent : within 5 % at Load Variation (%) : 0 → 50 → 50
28. Usage Condition		
C.S.W. Temp.	°C	≤ 32
C.F.W. Temp.	°C	75 ~ 85 (at Engine Outlet)
Ambient Temp.	°C	0 ~ 45
Exh. Back Press. (⌘2)	mmAq	≤ 300
Exh. Gas. Volume (⌘3)	m <sup>3</sup> /hr	3799
29. Volume of Lub. Oil & Cool. Fresh Water		
Lub. Oil	l	52 (Effective 26)
Cool. Fresh Water	l	42
30. Used Cool Water	:	• Always use clean soft water. • Use anti-corrosion solution mixed with fresh water. • On cold days, use anti-freezing solution mixed with fresh water.
31. Exchange Interval	:	• Exchange Interval of Lub. Oil : every 250 hr. • Exchange Interval of Lub. Oil Filter : every 500 hr. • Exchange Interval of Fuel Oil Fifter : every 500 hr.

32. Turbo-Charger : Type : Air Cooled Model : TD10 (M.H.I.)

NOTES :   
※1 • Low Calorific Value : 10200 kcal/kg  
• Allowance : + 5 %  
• at 100% Load (after 30 hr Test Running)  
※2 • at 100% Load  
※3 • Exh. Gas. Temp. : 673 K {400°C}.  
• at 100% Load



## **LAMPIRAN B**

### **DATA TIME TO FAILURE KOMPONEN DAN PENGELOMPOKAN SISTEM**

**DATA TIME TO FAILURE COMPONENT DAN PENGELOMPOKAN SISTEM**

No.	Repair/Replacement Part	MAINTENANCE RECORD 4 YEARS PERIOD YANMAR 8 KHL					
		CJN III - 17			CJN III - 24		
		AE Kanan	AE tengah	AE Kiri	AE Kanan	AE Tengah	AE Kiri
1	FUEL SYSTEM <i>Component Replacement (th.1997) :</i>						
	FO filter		23/06(750J)	-	02-Mar	-	-
	FO filter	-	-	24/06(750J)	-	06-Apr	-
	FO filter	-	18-Sep	-	23-07(500J)	-	13-Apr
	FO filter	-	-	07/10(500J)	-	11-Agust	-
	FO filter	-	-	-	09-Sep	-	-
	FO filter	-	-	-	-	04-11(946J)	-
	FO filter	-	-	-	-	-	24-11(1324J)
	Pompa Boster Bahan Bakar	-	-	18-Jul	-	-	-
	<i>Component Replacement (th.1998) :</i>						
	FO filter	-	13-02(500J)	13-03(1347J)	-	21-03(800J)	-
	FO filter	05-Jun	-	-	11-06(505J)	-	-
	FO filter	-	-	09-07(750J)	-	-	03-06(530J)
	FO filter	-	12-08(750J)	-	-	-	21-07(522J)
	FO filter	27-08(750J)	-	-	-	01-07(523J)	-
	FO filter	-	-	24-09(750J)	03-Agust	-	-
	FO filter	-	23-11(750J)	-	-	22-Agust	-
	FO filter	30-11(750J)	-	-	-	-	08-Sep
	FO filter	01-12(1000J)	-	-	-	09-Okt	-
	FO filter	-	-	-	08-Nop	-	-
	FO filter	-	-	-	-	-	15-Des
	FO Tank bocor	01-12(1000J)	-	-	-	-	-
	Nozzle Injektor	-	-	-	-	-	21-07(1053J)
	<i>Component Replacement (th.1999) :</i>						
	FO filter	-	-	07-01(1000J)	-	16-Jan	-
	FO filter	16-02(1500J)	-	-	18-Feb	-	-
	FO filter	02-03(1000J)	-	-	-	-	05-Feb
	FO filter	-	-	02-05(1000J)	-	08-Mar	-
	FO filter	-	05-06(1000J)	-	-	-	24-Mar
	FO filter	04-07(1000J)	-	-	-	13-Jun	-
	FO filter	-	24-07(1000J)	-	22-Jul	-	-
	FO filter	-	31-08(1000J)	-	-	04-07(1000J)	-
	FO filter	-	03-11(500J)	-	-	-	11-Okt
	FO filter	-	-	-	-	04-Des	-

No.	Repair/Replacement Part	MAINTENANCE RECORD 4 YEARS PERIOD YANMAR 6 KHL					
		CJN III - 17			CJN III - 24		
		AE Kanan	AE tengah	AE Kiri	AE Kanan	AE Tengah	AE Kiri
	FO filter	-	-	-	-	-	27-Des
	FO pump direpair	03-11(500J)	-	-	27-Des	-	-
	Nozzle Injektor	-	-	-	-	-	24-Mar
2	<i>Component Replacement (th.2000) :</i>						
	FO filter	24-01(1000J)	-	-	-	05-Jan	-
	FO filter	-	15-02(1000J)	-	-	06-Feb	-
	FO filter	-	-	03-03(1000J)	-	16-Mar	-
	FO filter	08-04(1000J)	-	-	-	-	13-Mar
	FO filter	-	-	21-05(1000J)	-	24-Apr	-
	FO filter	-	15-06(1000J)	-	-	-	05-Jun
	FO filter	-	-	26-Agust	08-Jul	-	-
	FO filter	-	-	-	-	21-07(750J)	-
	FO filter	-	-	-	-	-	04-Sep
	FO filter	-	-	-	25-Okt	-	-
	FO filter	-	-	-	-	14-Okt	-
	FO filter	-	-	-	-	-	20-Nop
	LUB. OIL SISTEM						
2	<i>Component Replacement (th. 1997) :</i>						
	LO filter	06-01(500J)	-	-	08-Jan	-	08-Jan
	LO filter	-	-	04-02(500J)	23-Jan	-	-
	LO filter	16-02(500J)	-	-	-	-	16-Feb
	LO filter	-	18-02(500J)	-	23-Mar	-	-
	LO filter	-	09-04(500J)	-	-	06-Apr	-
	LO filter	09-05(500J)	-	-	-	-	13-Apr
	LO filter	-	-	16-Mei	23-Jul	-	-
	LO filter	-	23-06(250J)	-	-	02-07(500J)	-
	LO filter	-	-	27-Jun	-	11-08(500J)	-
	LO filter	10-08(500J)	-	-	-	-	28-08(500J)
	LO filter	-	16-08(500J)	-	09-09(499J)	-	-
	LO filter	-	-	26-08(500J)	-	20-09(494J)	-
	LO filter	28-09(500J)	-	-	26-10(464J)	-	-
	LO filter	-	-	10-10(500J)	-	-	13-10(455J)
	LO filter	-	-	13-12(500J)	-	04-11(452J)	-
	LO filter	-	-	-	-	-	28-11(455J)
	LO filter	-	-	-	07-12(460J)	-	-
	LO filter	-	-	-	-	18-12(471J)	-
	LO carter	-	-	-	-	-	13-Apr

No.	Repair/Replacement Part	MAINTENANCE RECORD 4 YEARS PERIOD YANMAR 6 KHL					
		CJN III - 17			CJN III - 24		
		AE Kanan	AE tengah	AE Kiri	AE Kanan	AE Tengah	AE Kiri
	LO carter	-	-	-	09-09(499J)	-	-
	LO carter	-	-	-	-	20-09(494J)	-
	LO carter	-	-	-	26-10(484J)	-	-
	LO carter	-	-	-	-	-	13-10(455J)
	LO carter	-	-	-	-	04-11(452J)	-
	LO carter	-	-	-	-	-	28-11(455J)
	LO carter	-	-	-	07-12(460J)	-	-
	Sump tank direpair		15-12(1000J)		-	18-12(471J)	-
	LO Pump repair	15-12(1000J)	-	-	-	-	-
<i>Component Replacement (th. 1998) :</i>							
	LO filter		01-02(500J)		-	-	14-01(483J)
	LO filter	21-03(1070J)	-	-	21-01(477J)	-	-
	LO filter	-	22-03(966J)	-	-	05-Feb	-
	LO filter	-	-	09-04(951J)	06-03(419J)	-	-
	LO filter	-	-	16-Jun	-	21-03(469J)	-
	LO filter	-	23-07(500J)	-	-	-	05-03(521J)
	LO filter	-	-	29-07(500J)	24-Apr	-	-
	LO filter	10-08(500J)	-	-	-	-	18-Apr
	LO filter	20-09(500J)	-	-	-	08-Mei	-
	LO filter	-	01-09(500J)	-	11-06(505J)	-	-
	LO filter	-	-	10-09(500J)	-	-	03-06(518J)
	LO filter	-	28-10(500J)	-	-	-	21-07(522J)
	LO filter	14-11(500J)	-	-	-	01-07(497J)	-
	LO filter	-	-	08-11(500J)	03-Agust	-	-
	LO filter	26-12(500J)	-	-	-	22-Agust	-
	LO filter	-	12-12(500J)	-	21-Sep	-	-
	LO filter	-	-	26-12(500J)	-	-	08-Sep
	LO filter	-	-	-	-	09-Okt	-
	LO filter	-	-	-	-	-	26-Okt
	LO filter	-	-	-	08-Nop	-	-
	LO filter	-	-	-	-	01-Des	-
	LO filter	-	-	-	28-Des	-	-
	LO filter	-	-	-	-	-	15-Des
	LO carter	-	-	17-02(500J)	-	-	14-01(483J)
	LO carter	-	01-02(500J)	-	21-01(477J)	-	-
	LO carter	02-02(500J)	-	-	-	05-Feb	-

No.	Repair/Replacement Part	MAINTENANCE RECORD 4 YEARS PERIOD YANMAR 6 KHL					
		CJN III - 17			CJN III - 24		
		AE Kanan	AE tengah	AE Kiri	AE Kanan	AE Tengah	AE Kiri
	LO carter	21-03(566J)	-	-	06-03(419J)	-	-
	LO carter	-	22-03(515J)	-	-	21-03(469J)	-
	LO carter	-	-	09-04(544J)	-	-	05-03(521J)
	LO carter	-	23-07(500J)	-	24-Apr	-	-
	LO carter	-	-	29-07(500J)	-	-	18-Apr
	LO carter	-	01-08(500J)	-	-	08-Mei	-
	LO carter	14-11(500J)	-	-	11-06(505J)	-	-
	LO carter	-	-	08-11(500J)	-	-	03-06(518J)
	LO carter	26-12(500J)	-	-	-	-	21-07(522J)
	LO carter	-	12-12(500J)	-	-	01-07(497J)	-
	LO carter	-	-	26-12(500J)	03-Agust	-	-
	LO carter	-	-	-	-	22-Agust	-
	LO carter	-	-	-	21-Sep	-	-
	LO carter	-	-	-	-	-	08-Sep
	LO carter	-	-	-	-	09-Okt	-
	LO carter	-	-	-	-	-	26-Okt
	LO carter	-	-	-	08-Nop	-	-
	LO carter	-	-	-	-	01-Des	-
	LO carter	-	-	-	28-Des	-	-
	LO carter	-	-	-	-	-	15-Des
	LO Pump repair	-	26-12(500J)	-	-	-	-
	<i>Component Replacement (th. 1999) :</i>						
	LO filter	-	22-01(500J)	-	-	16-Jan	-
	LO filter	-	11-03(500J)	-	-	-	05-Feb
	LO filter	-	-	22-Mar	18-Feb	-	-
	LO filter	-	21-04(500J)	-	-	08-Mar	-
	LO filter	22-Mei	-	-	-	-	24-Mar
	LO filter	-	05-06(500J)	-	06-Apr	-	-
	LO filter	-	-	15-06(500J)	-	28-04(536J)	-
	LO filter	04-07(500J)	-	-	-	-	12-05(520J)
	LO filter	-	24-07(500J)	-	-	13-06(506J)	-
	LO filter	-	27-07(500J)	22-07(510J)	-	-	-
	LO filter	-	31-08(500J)	-	-	-	04-07(516J)
	LO filter	23-10(500J)	-	-	03-08(504J)	-	-
	LO filter	-	14-10(500J)	23-10(500J)	-	19-08(503J)	-
	LO filter	-	-	-	30-09(500J)	-	-



No.	Repair/Replacement Part	MAINTENANCE RECORD 4 YEARS PERIOD YANMAR 6 KHL					
		CJN III - 17			CJN III - 24		
		AE Kanan	AE tengah	AE Kiri	AE Kanan	AE Tengah	AE Kiri
	LO filter	-	03-11(500J)	-	-	-	11-Okt
	LO filter	-	-	26-12(500J)	-	22-Nop	-
	LO filter	-	25-12(500J)	-	-	-	13-Nop
	LO filter	01-Des	-	-	-	-	27-Des
	LO filter	-	-	-	-	04-Des	-
	LO carter	-	11-03(500J)	-	-	16-Jan	-
	LO carter	-	-	22-Mar	-	-	05-Feb
	LO carter	-	21-04(500J)	-	18-Feb	-	-
	LO carter	22-Mei	-	-	-	08-Mar	-
	LO carter	-	-	02-05(500J)	-	-	24-Mar
	LO carter	-	05-06(500J)	-	06-Apr	-	-
	LO carter	-	-	15-06(500J)	-	28-04(536J)	-
	LO carter	04-07(500J)	-	-	-	-	12-05(520J)
	LO carter	-	24-07(500J)	-	13-06(506J)	-	-
	LO carter	-	-	27-07(500J)	22-07(510J)	-	-
	LO carter	-	31-08(500J)	-	-	-	04-07(516J)
	LO carter	-	-	-	-	03-08(504J)	-
	LO carter	-	-	-	-	-	19-08(503J)
	LO carter	-	-	-	-	-	28-Des
	LO carter	-	-	-	-	04-Des	-
	LO Pump repair	-	-	-	04-Des	-	-
	<i>Component Replacement (th. 2000) :</i>						
	LO filter	19-01(500J)	-	-	-	05-Jan	-
	LO filter	-	24-01(500J)	-	-	06-Feb	-
	LO filter	-	-	30-01(500J)	-	16-Mar	-
	LO filter	-	30-03(500J)	-	-	-	13-Mar
	LO filter	01-03(500J)	-	-	16-Mei	-	-
	LO filter	-	-	01-05(500J)	-	10-Jun	-
	LO filter	-	02-05(500J)	-	-	-	05-Jun
	LO filter	20-05(500J)	-	-	08-Jul	-	-
	LO filter	-	-	28-06(500J)	-	21-07(500J)	21-07(500J)
	LO filter	-	15-06(500J)	-	17-Agust	-	-
	LO filter	11-07(500J)	-	-	-	02-Sep	-
	LO filter	-	-	12-Agust	-	-	04-Sep
	LO filter	-	07-Agust	-	25-Okt	-	-
	LO filter	-	-	23-Agust	-	14-Okt	-
	LO filter	-	-	26-09(500J)	-	-	09-Okt

No.	Repair/Replacement Part	MAINTENANCE RECORD 4 YEARS PERIOD YANMAR 6 KHL					
		CJN III - 17			CJN III - 24		
		AE Kanan	AE tengah	AE Kiri	AE Kanan	AE Tengah	AE Kiri
	LO filter		23-Sep	-	-	-	20-Nop
	LO filter		19-Sep	-	-	-	-
	LO filter		31-Okt	-	-	-	-
	LO filter	08-10(500J)	-	-	-	-	-
	LO carter	-	26-09(500J)	-	05-Jan	-	-
	LO carter	-	31-Okt	-	06-Feb	-	-
	LO carter	-	-	-	16-Mar	-	-
	LO carter	-	-	-	13-Mar	-	-
	LO carter	-	-	16-Mei	-	-	-
	LO carter	-	-	-	10-Jun	-	-
	LO carter	-	-	-	05-Jun	-	-
	LO carter	-	-	08-Jul	-	-	-
	LO carter	-	-	-	21-07(500J)	21-07(500J)	-
	LO carter	-	-	17-Agust	-	-	-
	LO carter	-	-	-	02-Sep	-	04-Sep
	LO carter	-	-	25-Okt	-	-	-
	LO carter	-	-	-	14-Okt	-	-
	LO carter	-	-	-	-	09-Okt	-
	LO carter	-	-	-	-	20-Nop	-
3	COOLING SYSTEM						
	Component Replacement (th. 1997) :						
	FW cooler	-	-	03-01(600J)	-	-	-
	FW cooler	-	-	-	-	-	12-Jan
	FW cooler	-	-	-	-	-	11-Apr
	FW cooler	-	-	-	-	-	01-Mei
	FW cooler	-	-	22-Jun	-	-	-
	FW cooler	-	-	-	10-Jun	-	-
	FW cooler	-	-	-	22-Jul	-	-
	FW cooler	-	-	01-Agust	-	-	-
	FW cooler	-	-	-	02-Agust	-	-
	FW cooler	-	-	05-Sep	-	-	18-Agust
	FW cooler	-	-	-	12-Sep	-	-
	FW cooler	-	-	-	-	11-Sep	-
	FW cooler	-	-	08-Okt	-	-	-

No.	Repair/Replacement Part	MAINTENANCE RECORD 4 YEARS PERIOD YANMAR 6 KHL						
		CJN III - 17			CJN III - 24			
		AE Kanan	AE tengah	AE Kiri	AE Kanan	AE Tengah	AE Kiri	
	FW cooler	-	-	-	23-Okt	-	-	
	FW cooler	-	-	-	-	03-Okt	-	
	FW cooler	-	-	-	-	-	15-Okt	
	FW cooler	-	-	-	-	-	18-Nop	
	FW cooler	-	-	-	-	-	28-Nop	
	FW cooler	-	-	-	01-12(417J)	-	-	
	FW cooler	-	-	-	-	-	15-12(279J)	
	LO cooler	-	-	-	-	-	-	
	LO cooler	-	02-01(600J)	-	-	-	-	
	LO cooler	10-01(600J)	-	-	-	-	12-01(250J)	
	LO cooler	-	-	22-06(600J)	-	-	01-Mei	
	LO cooler	04-07(600J)	-	-	22-Jun	-	-	
	LO cooler	-	-	-	-	10-Jun	-	
	LO cooler	-	-	-	-	-	16-Jun	
	LO cooler	-	-	-	-	22-Jul	-	
	LO cooler	-	-	-	01-Agust	-	-	
	LO cooler	-	-	-	-	02-Agust	-	
	LO cooler	-	-	-	-	-	18-Agust	
	LO cooler	-	-	-	-	12-Sep	-	
	LO cooler	-	-	-	-	-	11-Sep	
	LO cooler	-	-	-	01-12(417J)	-	-	
	LO cooler	-	05-Okt	-	-	15-12(279J)	-	
	SW pump	-	-	-	-	15-12(279J)	-	
	Intercooler	-	-	-	08-Jan	-	-	
	Intercooler	-	-	-	08-Apr	-	-	
	Pipa pendingin air laut	-	-	05-Okt	-	-	-	
	<i>Component Replacement (th.1998) :</i>							
	FW cooler	-	-	-	-	29-Mar	-	
	FW cooler	-	-	-	-	-	14-Mar	
	FW cooler	-	-	-	06-Apr	-	-	
	FW cooler	-	-	-	18-Apr	-	-	
	FW cooler	-	-	-	-	04-Apr	-	
	FW cooler	-	-	-	19-Jun	-	-	
	FW cooler	-	-	-	-	08-06(266J)	-	
	FW cooler	-	-	-	-	-	03-Apr	
	FW cooler	-	-	-	27-Agust	-	08-06(591J)	

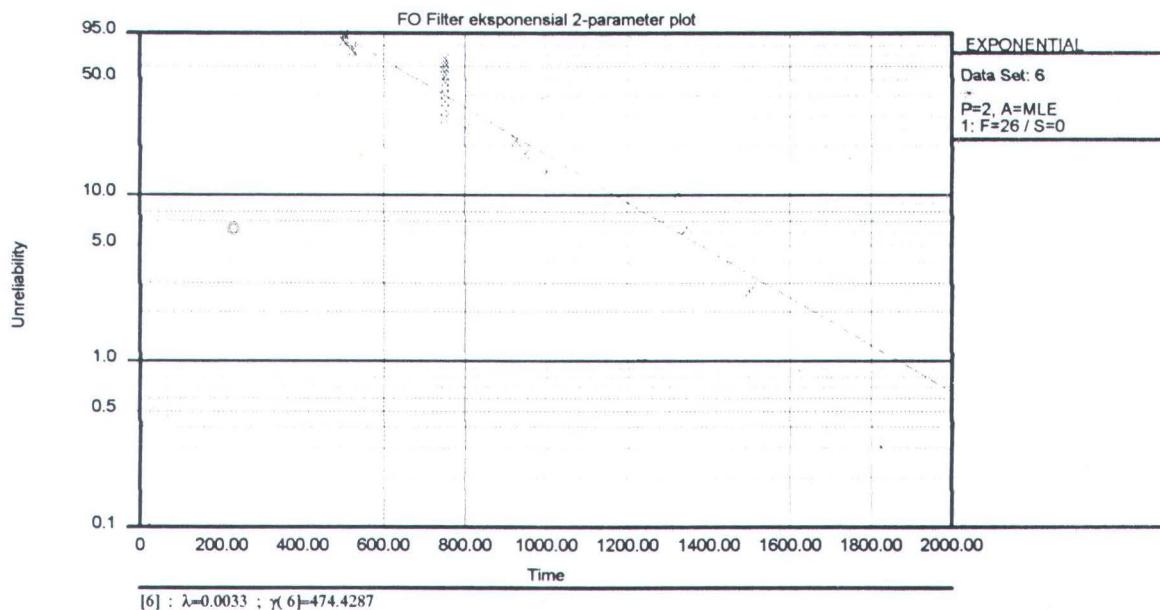
No.	Repair/Replacement Part	MAINTENANCE RECORD 4 YEARS PERIOD YANMAR 6 KHL					
		CJN III - 17			CJN III - 24		
		AE Kanan	AE tengah	AE Kiri	AE Kanan	AE Tengah	AE Kiri
	FW cooler	-	-	-	-	-	27-Agust
	FW cooler	-	-	-	-	-	29-Agust
	FW cooler	-	-	-	29-Sep	-	-
	FW cooler	-	-	-	-	29-Sep	-
	FW cooler	-	-	-	-	27-Okt	-
	FW cooler	-	-	-	-	14-Nop	-
	FW cooler	-	-	-	-	-	21-Nop
	LO cooler	-	-	-	18-Apr	-	-
	LO cooler	-	-	-	-	04-Apr	-
	LO cooler	-	-	-	19-Jun	-	-
	LO cooler	-	-	-	-	08-06(266J)	-
	LO cooler	-	-	-	-	-	08-06(591J)
	LO cooler	-	-	-	27-Agust	-	-
	LO cooler	-	-	-	-	-	27-Agust
	Cooling pum repair	-	-	13-06(600J)	-	-	-
	Intercooler	13-06(600J)	-	-	-	-	-
	Pipa pendingin air laut (repair)	19-Apr	-	-	-	-	-
	<i>Component Replacement (th.1999) :</i>						
	FW cooler	07-Mei	-	-	-	-	-
	FW cooler	-	-	03-Nop	-	-	-
	FW cooler	-	-	09-Des	-	-	-
	FW cooler	-	21-Des	-	-	-	-
	FW cooler	09-Des	-	-	-	-	-
	LO cooler	07-Mei	-	-	-	07-Mei	-
	LO cooler	-	-	-	-	-	26-Nop
	Intercooler	07-Mei	-	-	-	-	12-Mei
	Intercooler	-	-	14-Jul	05-Mei	-	-
	Pipa pendingin air laut (repair)	-	-	-	-	11-Jun	-
	<i>Component Replacement (th.2000) :</i>						
	FW cooler (repair)	36.915	-	-	3698800%	-	-
	FW cooler	-	-	26-Apr	-	24-Apr	-
	FW cooler	-	27-Apr	-	16-Mei	-	-
	FW cooler	-	-	04-Sep	-	02-Sep	-
	FW cooler	-	-	-	-	-	18-Sep
	FW cooler	-	-	-	-	-	09-Okt
	FW cooler	-	-	-	16-Nop	-	-
	FW cooler	-	-	-	-	16-Nop	-
	FW cooler	-	-	-	-	-	16-Nop

No.	Repair/Replacement Part	MAINTENANCE RECORD 4 YEARS PERIOD YANMAR 6 KHL					
		CJN III - 17		CJN III - 24			
		AE Kanan	AE tengah	AE Kiri	AE Kanan	AE Tengah	AE Kiri
	FW cooler	-	-	-	11-Des	-	-
	FW cooler	-	-	-	-	-	02-Des
	LO cooler	-	-	26-Apr	-	06-Mar	-
	LO cooler	-	27-Apr	-	27-Apr	-	-
	LO cooler	-	-	04-Sep	-	-	06-Mei
	LO cooler	-	-	-	-	02-Jun	-
	LO cooler	-	-	-	-	-	18-Sep
	LO cooler	-	-	-	-	14-Okt	-
	Cooling pump	07-Okt	-	-	11-Des	-	-
	Intercooler (repair)	-	-	07-Okt	-	-	-
	Pipa pendingin air laut (repair)	-	08-Feb	-	-	-	20-Feb
	Pipa pendingin air laut (repair)	15-Apr	-	-	-	-	-
	Pipa pendingin air laut (repair)	-	-	07-Okt	-	-	-
	Pipa pendingin air laut (repair)	02-Okt	02-Okt	-	-	-	-
	Pipa pendingin air laut (repair)	26-Okt	-	-	-	-	-
4	<b>TURBOCHARGE</b>						
	<i>Component Replacement (th.1997) :</i>						
	Filter T/C	24-Feb	24-Feb	24-Feb	-	15-Jun	-
	Filter T/C	-	-	02-Jun	-	-	16-Jun
	Filter T/C	-	27-Jun	-	07-Agust	-	-
	Filter T/C	11-Sep	-	11-Sep	-	-	-
	Filter T/C	20-Des	-	-	-	-	-
	<i>Component Replacement (th.1999) :</i>						
	Filter T/C	-	-	25-Okt	-	-	-
	Filter T/C	-	25-Okt	-	-	-	-
	Filter T/C	25-Okt	-	-	-	-	-
	<i>Component Replacement (th.2000) :</i>						
	Filter T/C	21-Feb	21-Feb	-	-	-	-
	Filter T/C	-	-	05-Mar	-	-	-
	Filter T/C	10-Mei	-	10-Mei	-	-	-
	Filter T/C	28-Jun	28-Jun	28-Jun	-	-	-
	Filter T/C	-	-	12-Agust	-	-	-
	Filter T/C	-	-	23-Agust	-	-	-
	Filter T/C	16-Agust	-	-	-	-	-
	Filter T/C	04-Okt	-	-	-	-	-
	Filter T/C	-	12-Okt	-	-	-	-
	Filter T/C	-	-	15-Sep	-	-	-
	Filter T/C	30-Sep	-	-	-	-	-

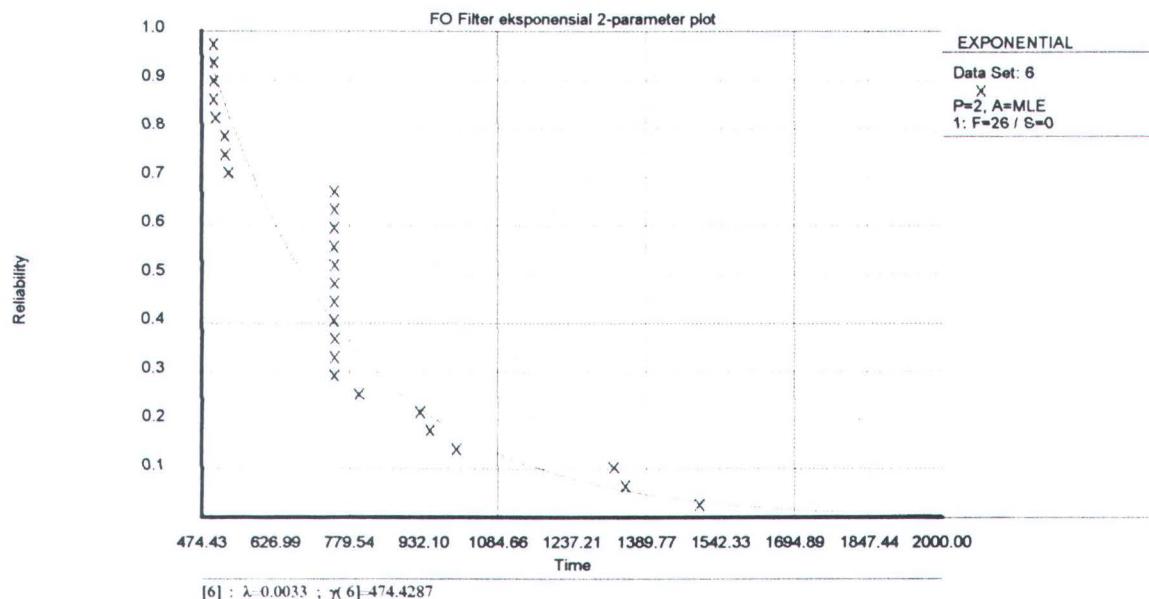
## **LAMPIRAN C**

**HASIL PLOTTING TTF KOMPONEN  
DENGAN SOFTWARE WEIBULL ++**

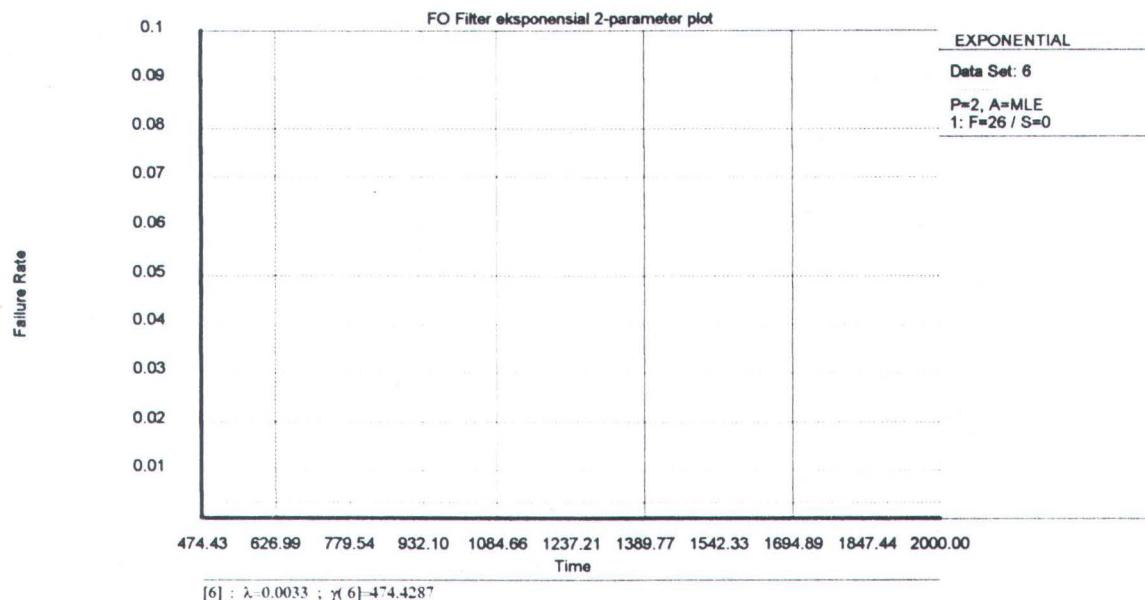
## HASIL PLOTTING TTF KOMPONEN DENGAN SOFTWARE WEIBULL ++



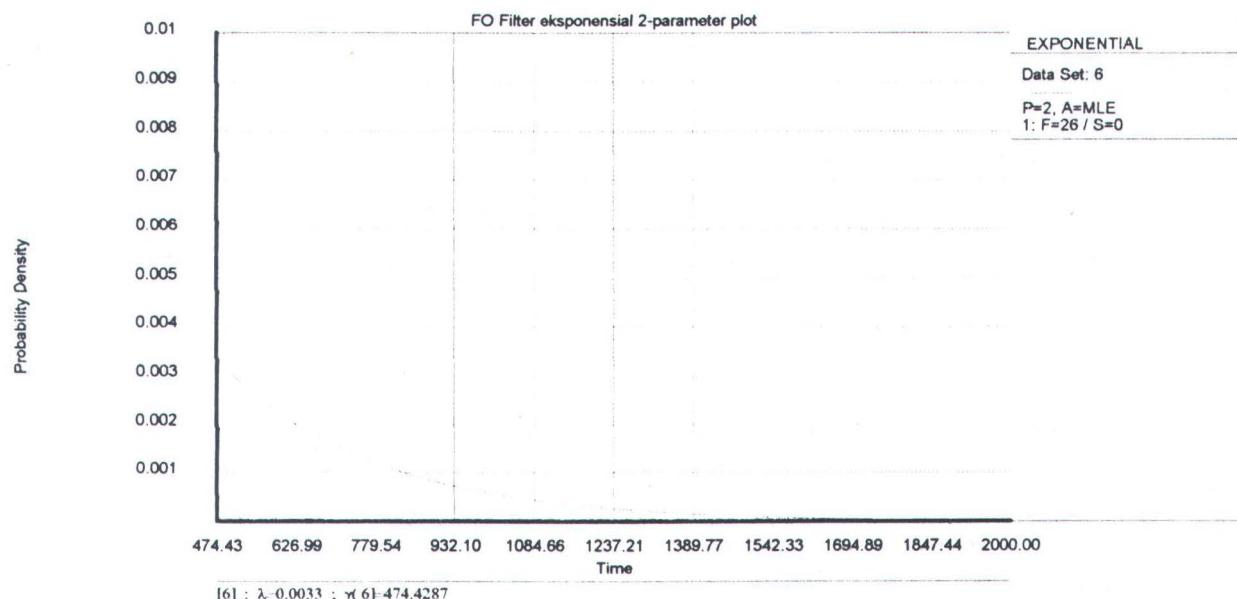
Gambar C.1a.  
Grafik Unreliability untuk FO Filter



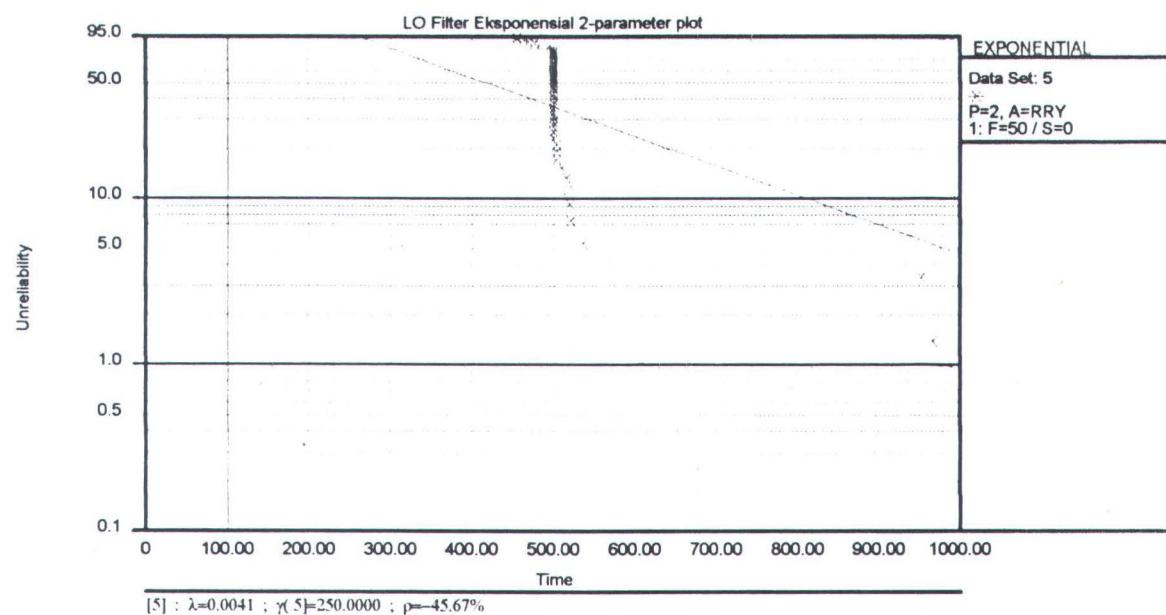
Gambar C.1b.  
Grafik Reliability untuk FO Filter



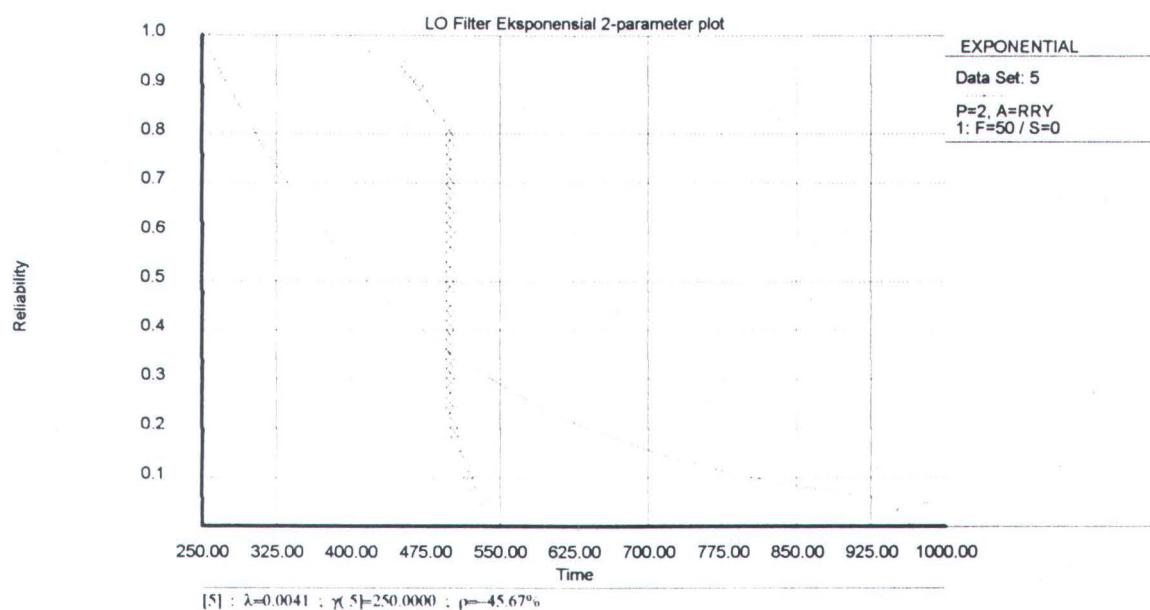
Gambar C.1c.  
Grafik Failure Rate untuk FO Filter



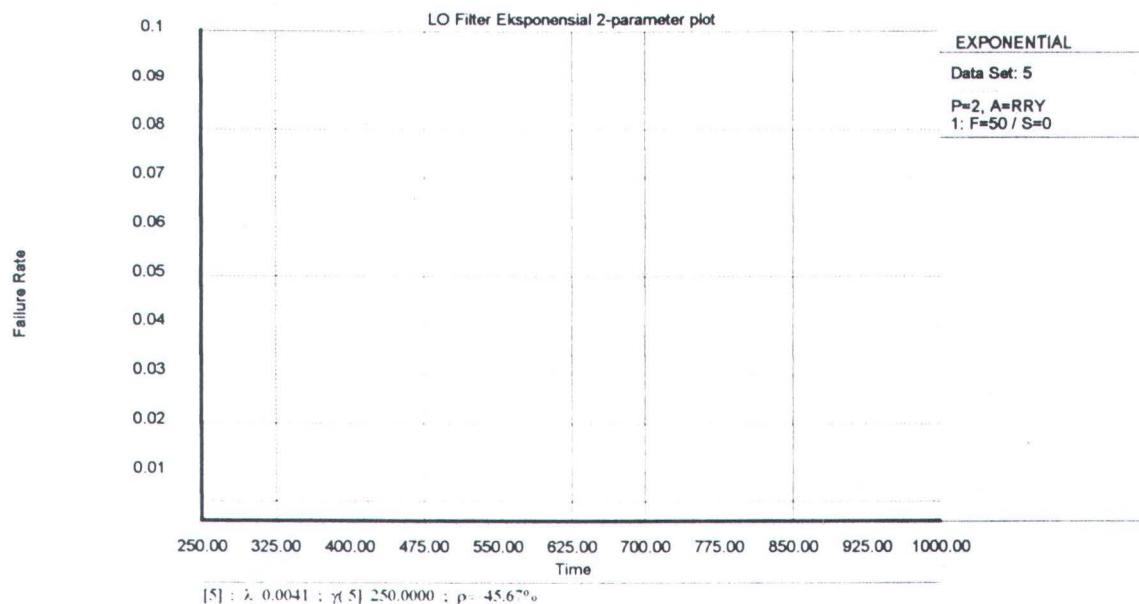
Gambar C.1d.  
Grafik Probability Density Function untuk FO Filter



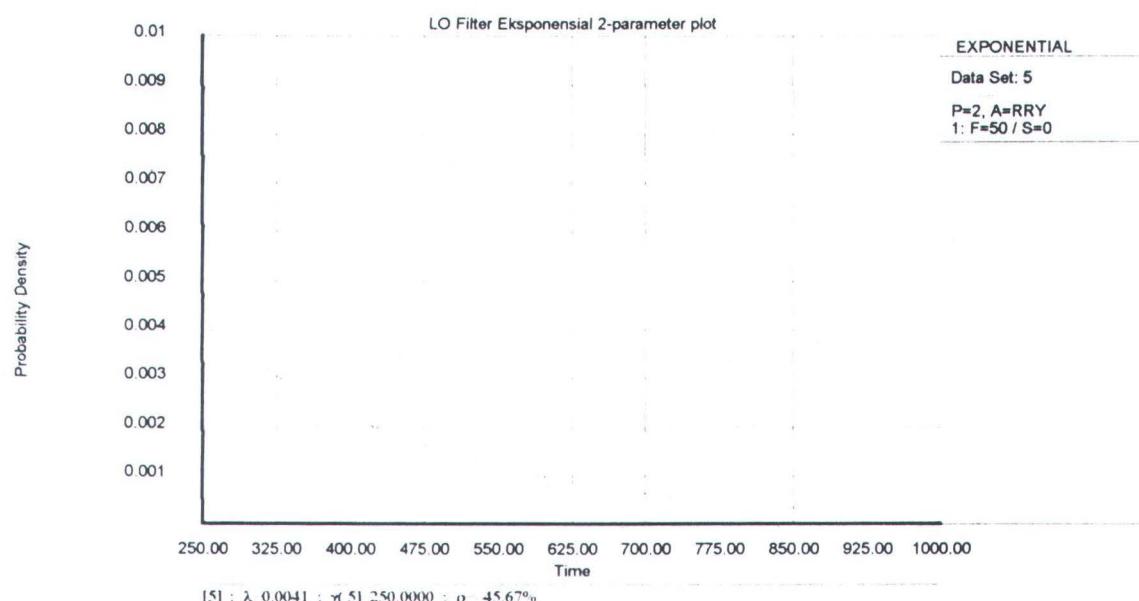
Gambar C.2a.  
Grafik Unreliability untuk LO Filter



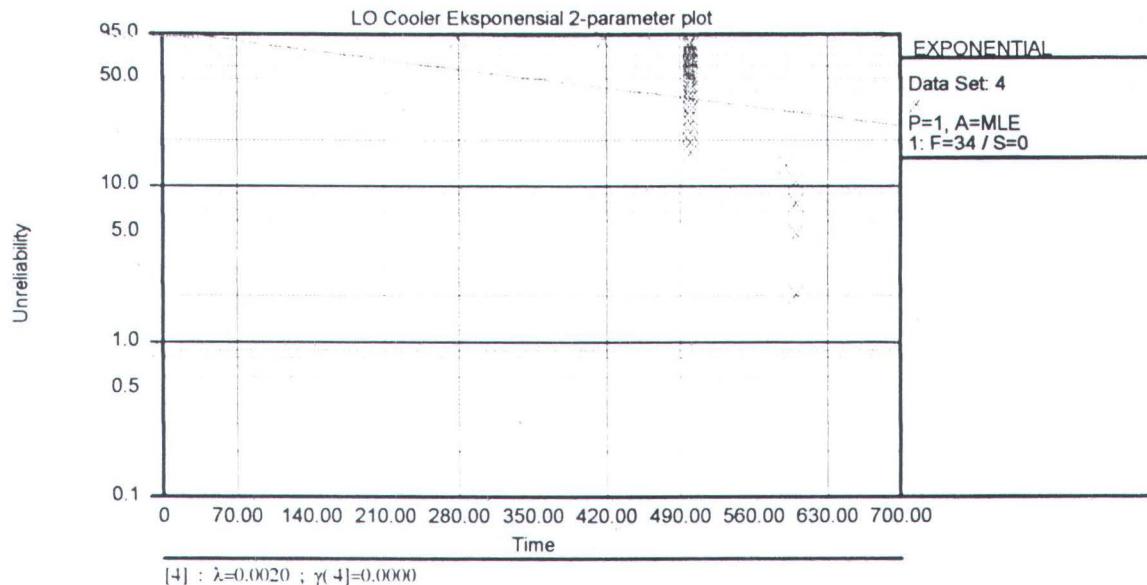
Gambar C.2b.  
Grafik Reliability untuk LO Filter



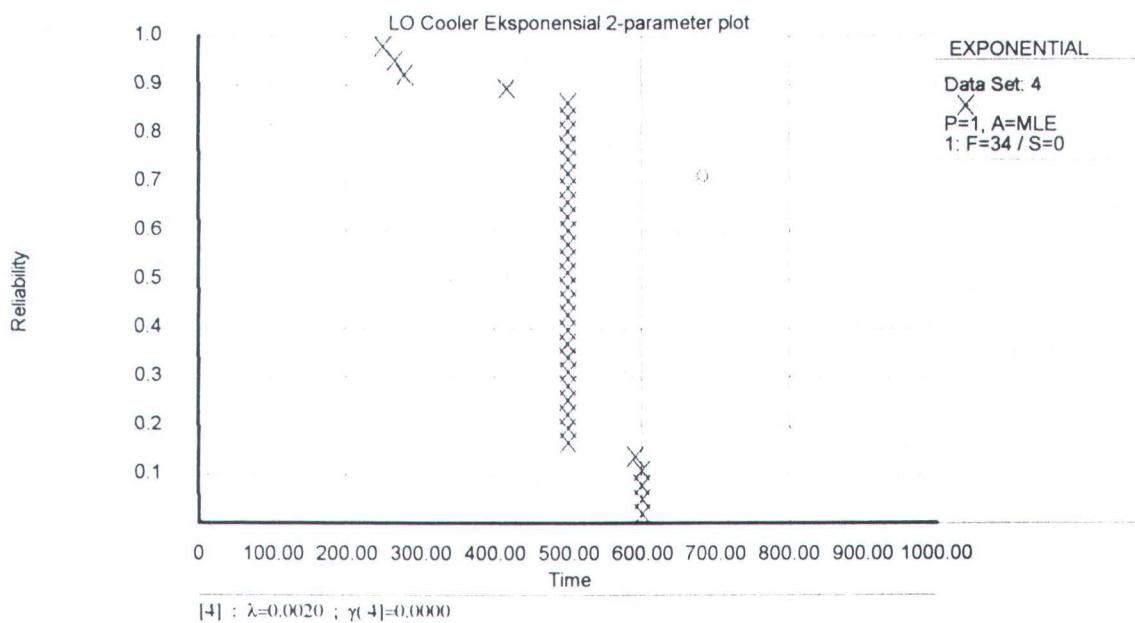
Gambar C.2c.  
Grafik Failure Rate untuk LO Filter



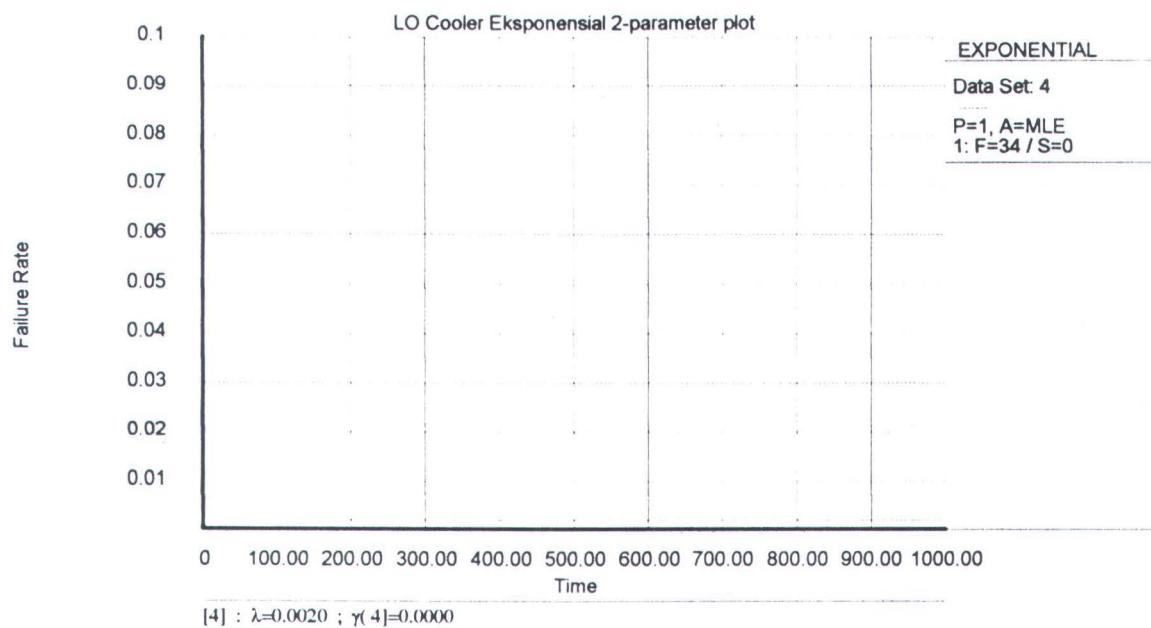
Gambar C.2d.  
Grafik Probability Density Function untuk LO Filter



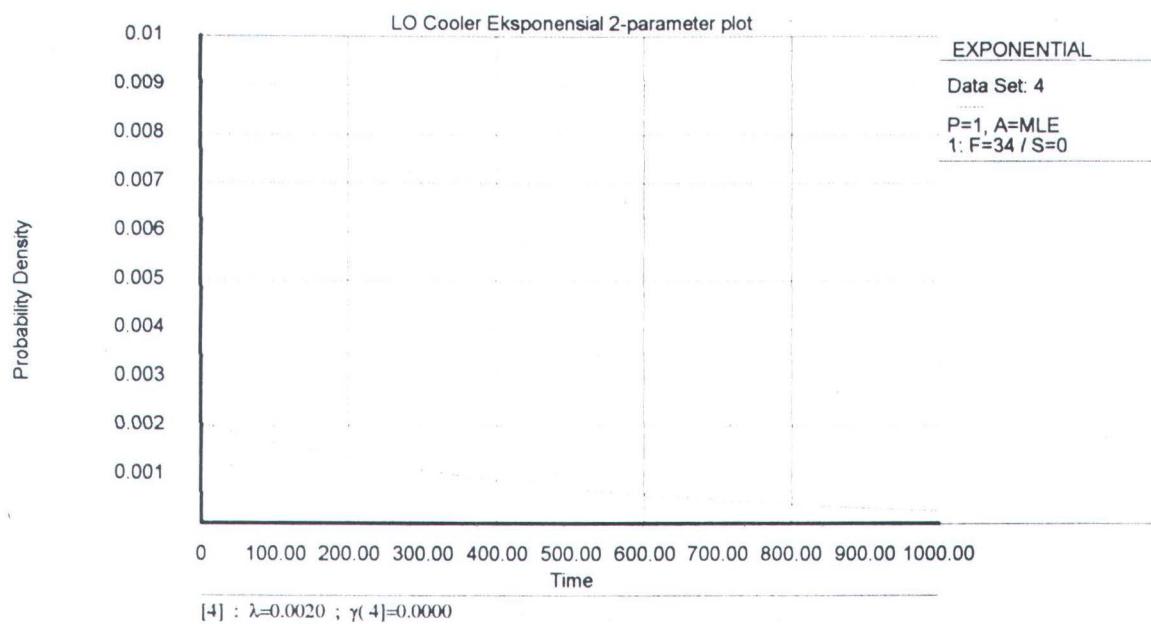
Gambar C.3a.  
Grafik Unreliability untuk LO Cooler



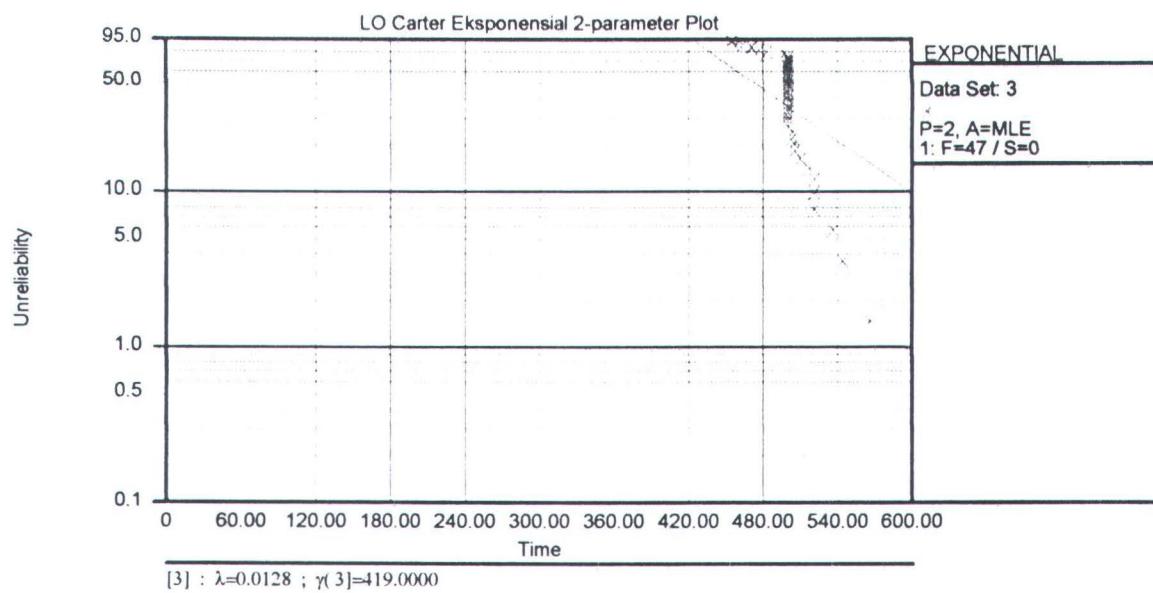
Gambar C.3b.  
Grafik Reliability untuk LO Cooler



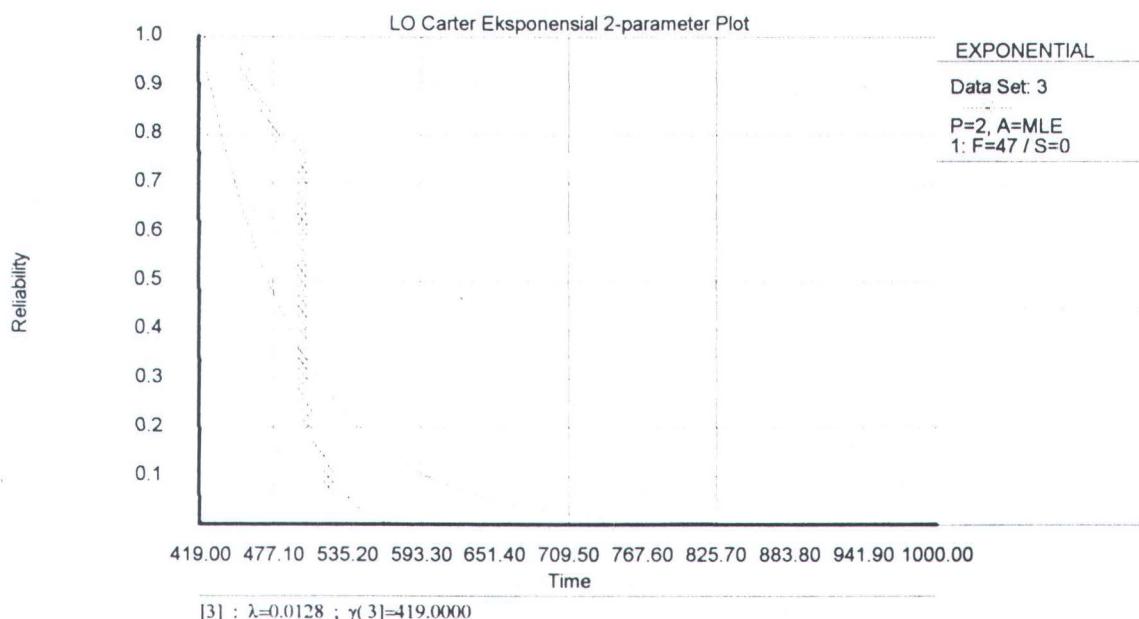
Gambar C.3c.  
Grafik Failure Rate untuk LO Cooler



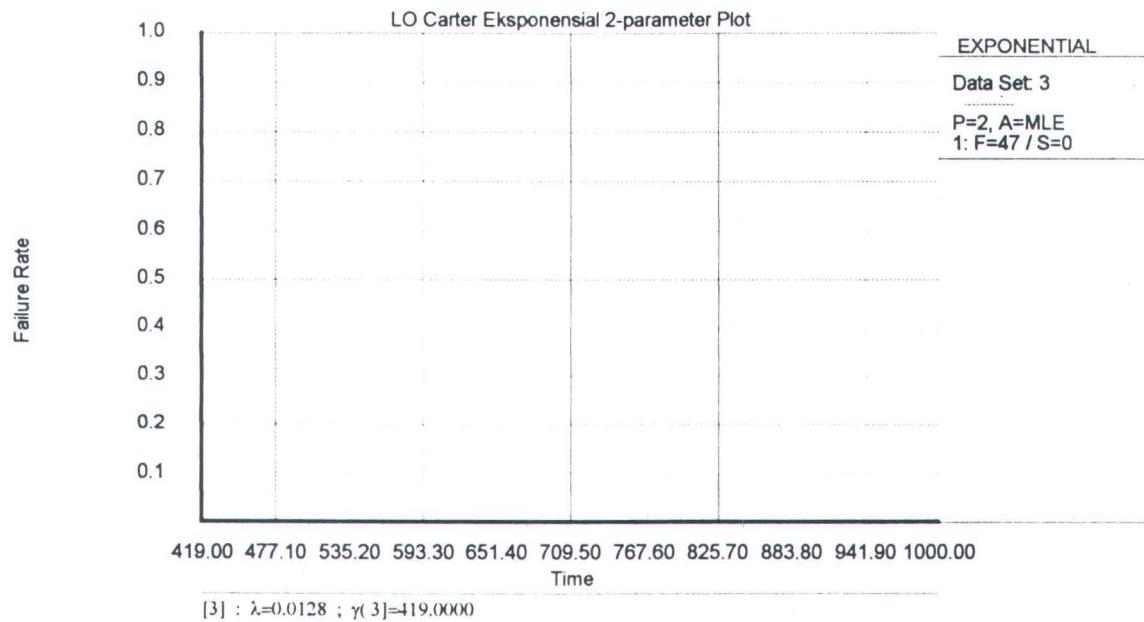
Gambar C.3d.  
Grafik Probability Density Function untuk LO Cooler



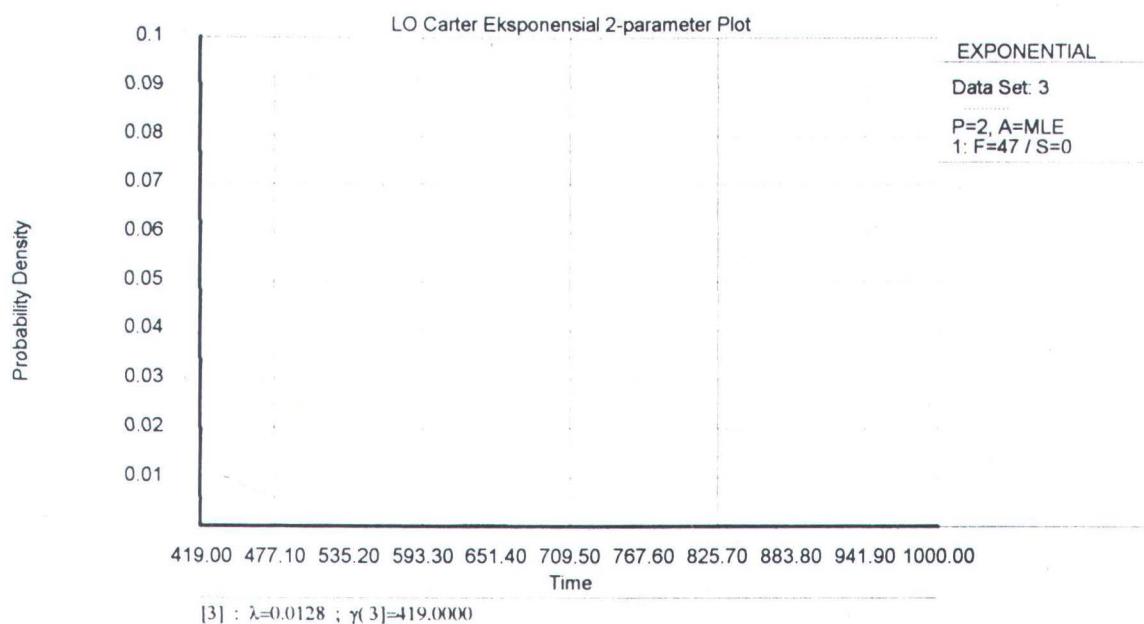
Gambar C.4a.  
Grafik Unreliability untuk LO Carter



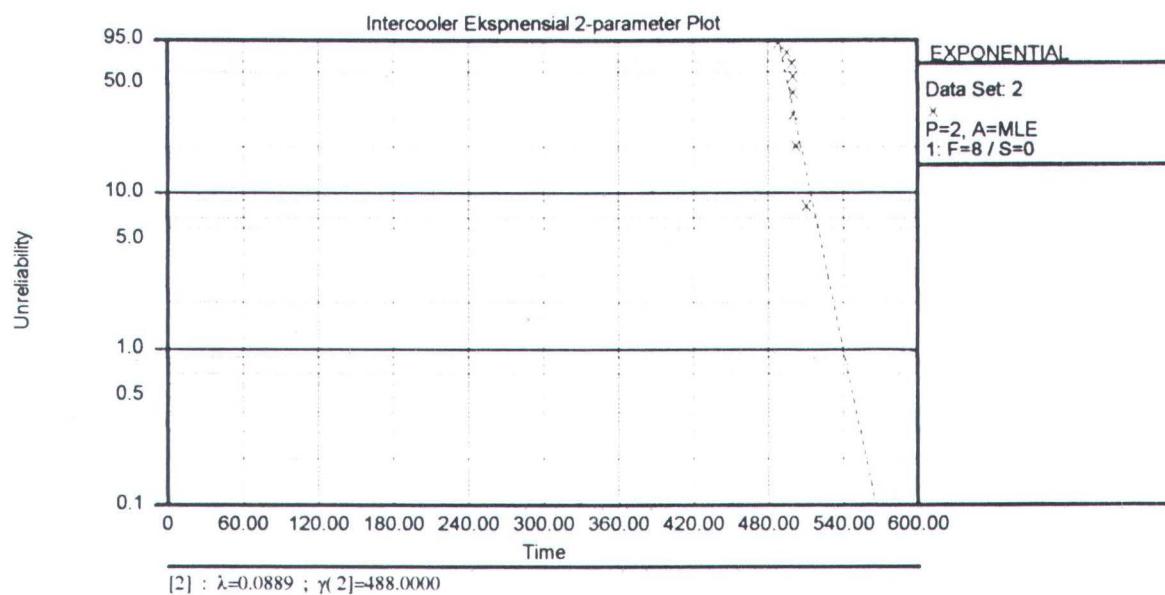
Gambar C.4b.  
Grafik Reliability untuk LO Carter



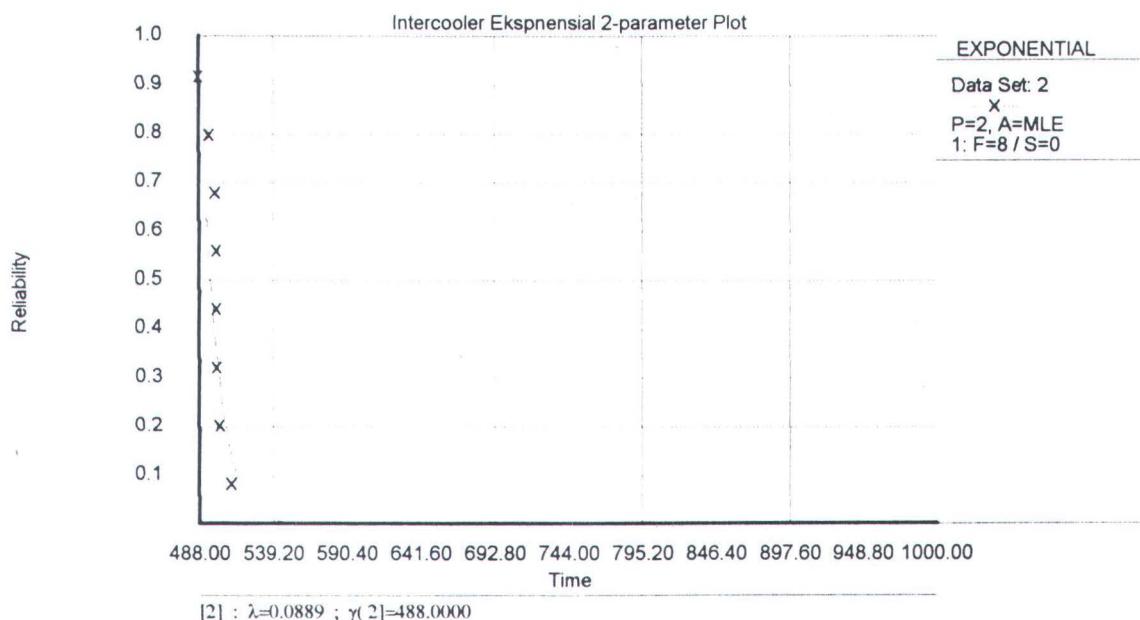
Gambar C.4c.  
Grafik Failure Rate untuk LO Carter



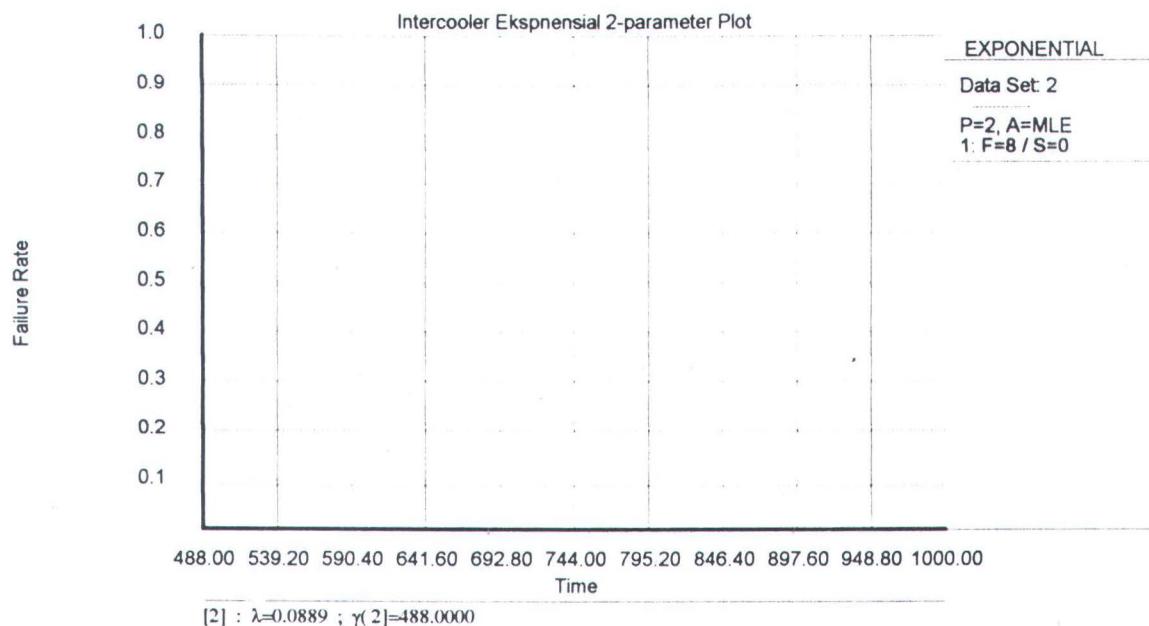
Gambar C.4d.  
Grafik Probability Density Function untuk LO Carter



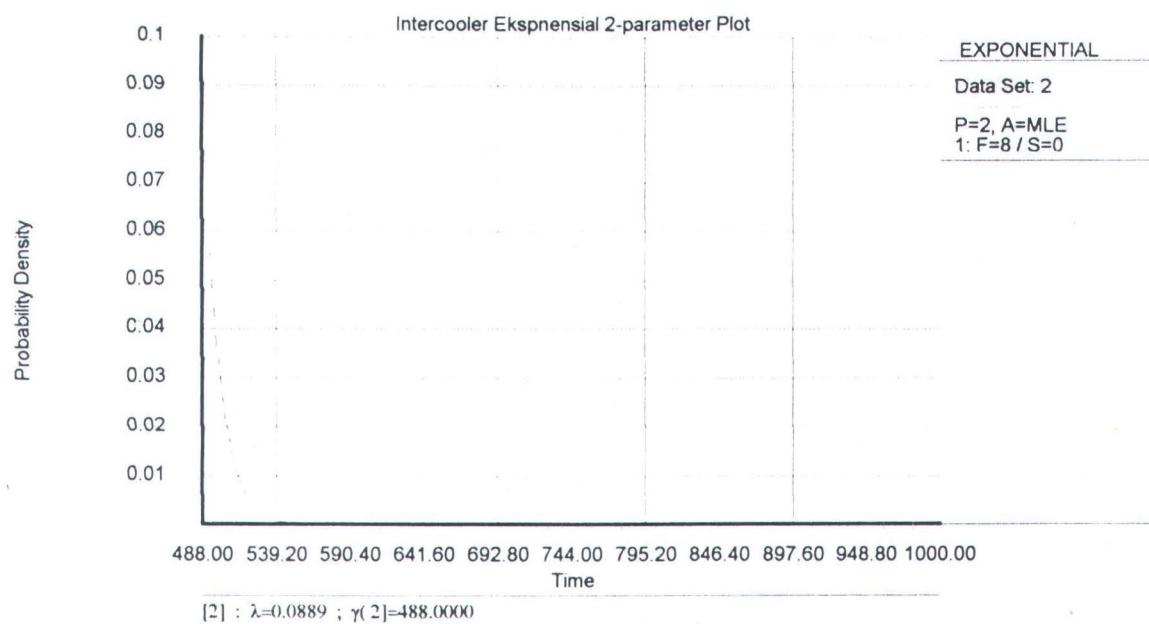
Gambar C.5a.  
Grafik Unreliability untuk Intercooler



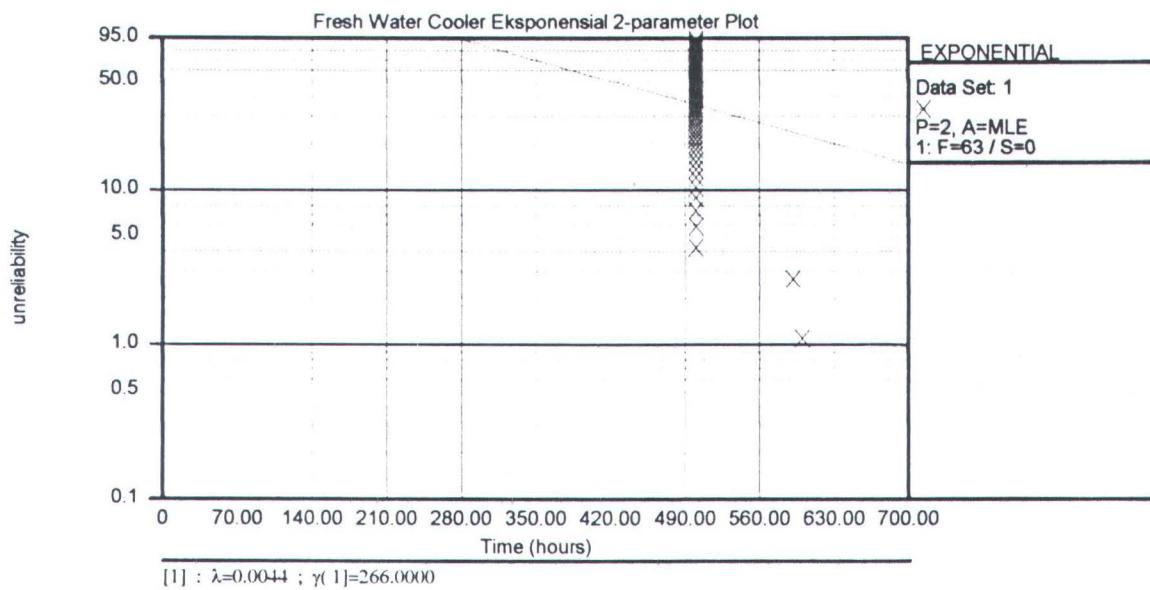
Gambar C.5b.  
Grafik Reliability untuk Intercooler



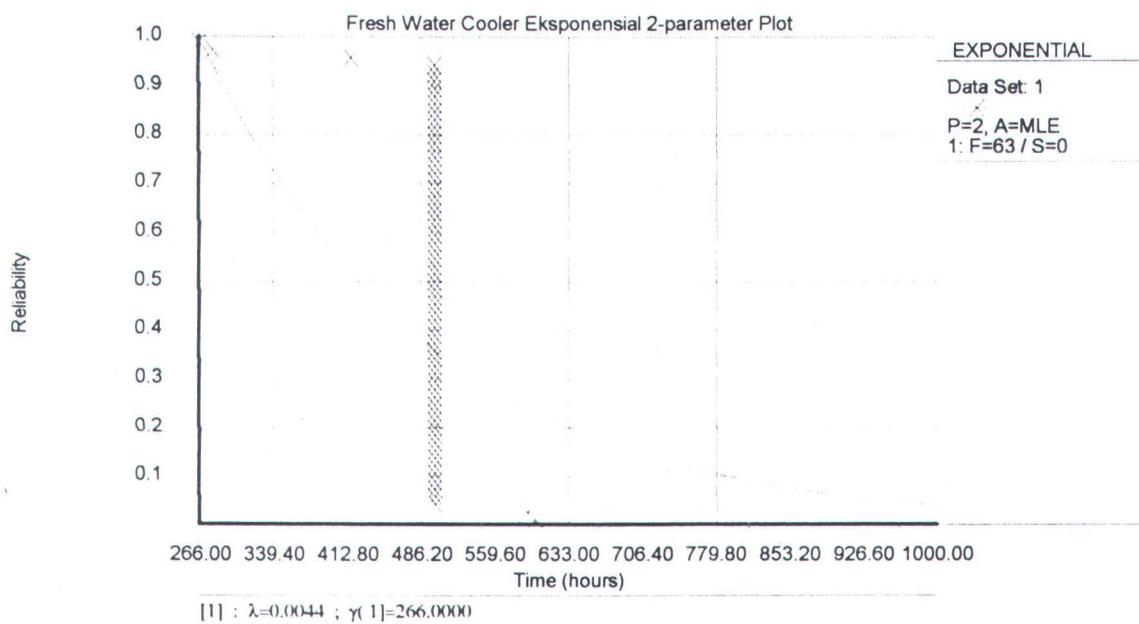
Gambar C.5c.  
Grafik Failure Rate untuk Intercooler



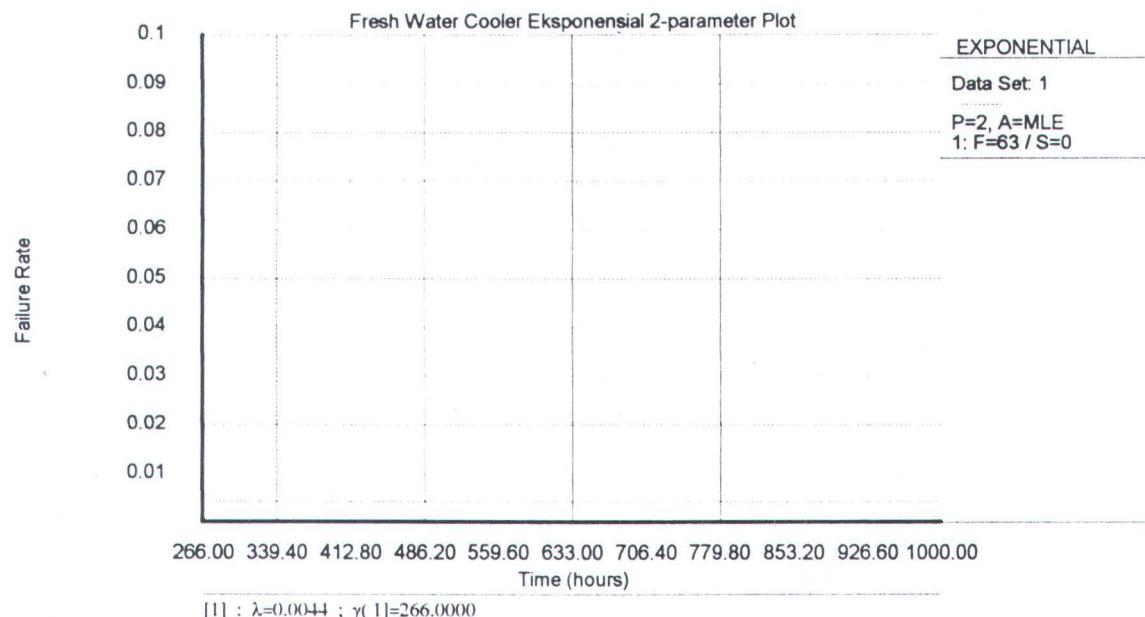
Gambar C.5d.  
Grafik Probability Density Function untuk Intercooler



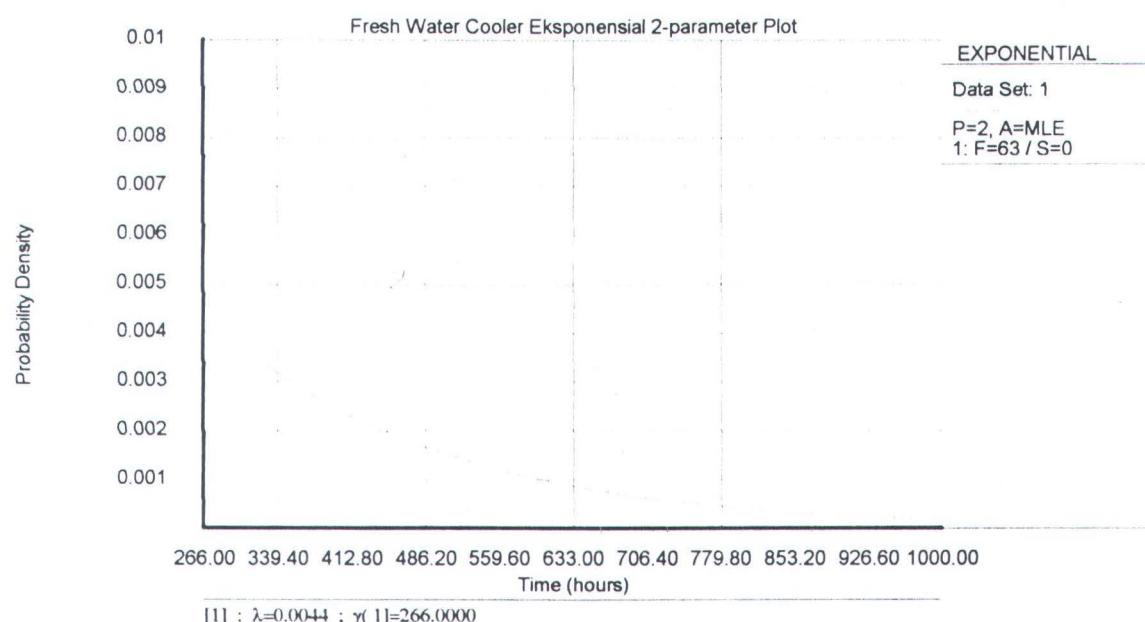
Gambar C.6a.  
Grafik Unreliability untuk Fresh Water Cooler



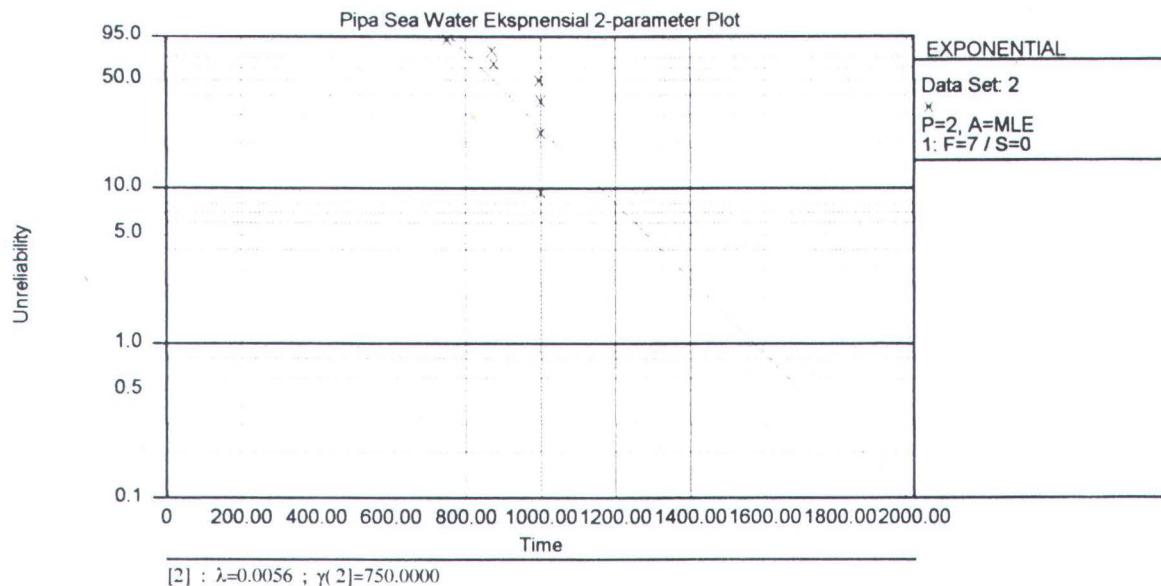
Gambar C.6b.  
Grafik Reliability untuk Fresh Water Cooler



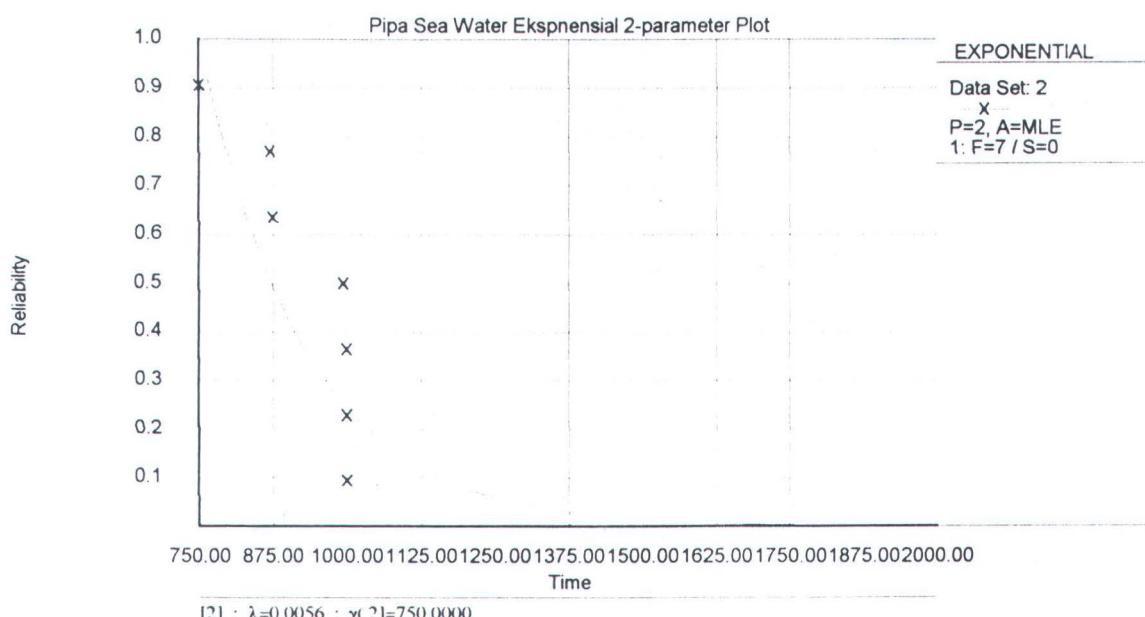
Gambar C.6c.  
Grafik Failure Rate untuk Fresh Water Cooler



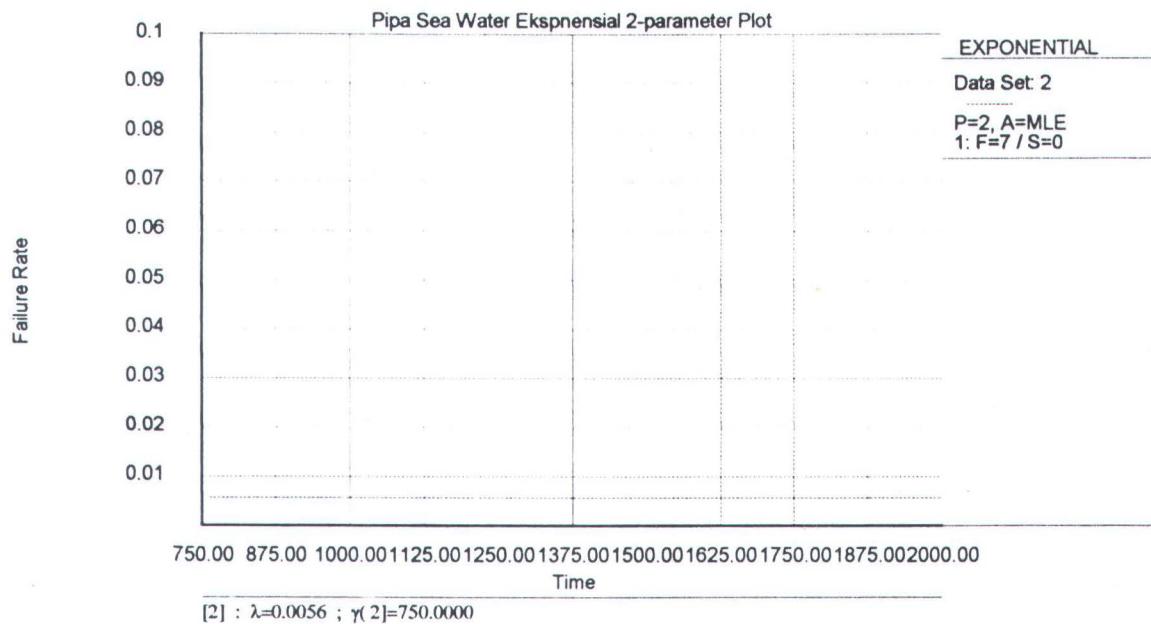
Gambar C.6d.  
Grafik Probability Density Function untuk Fresh Water Cooler



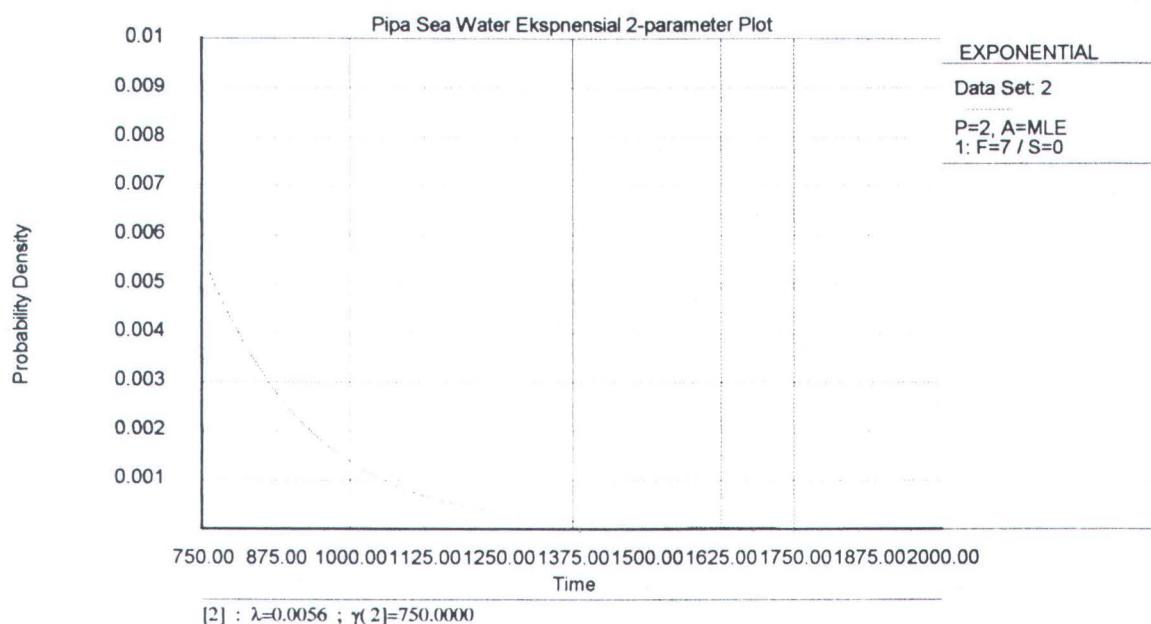
Gambar C.7a  
Grafik Unreliability untuk Pipa Sea Water



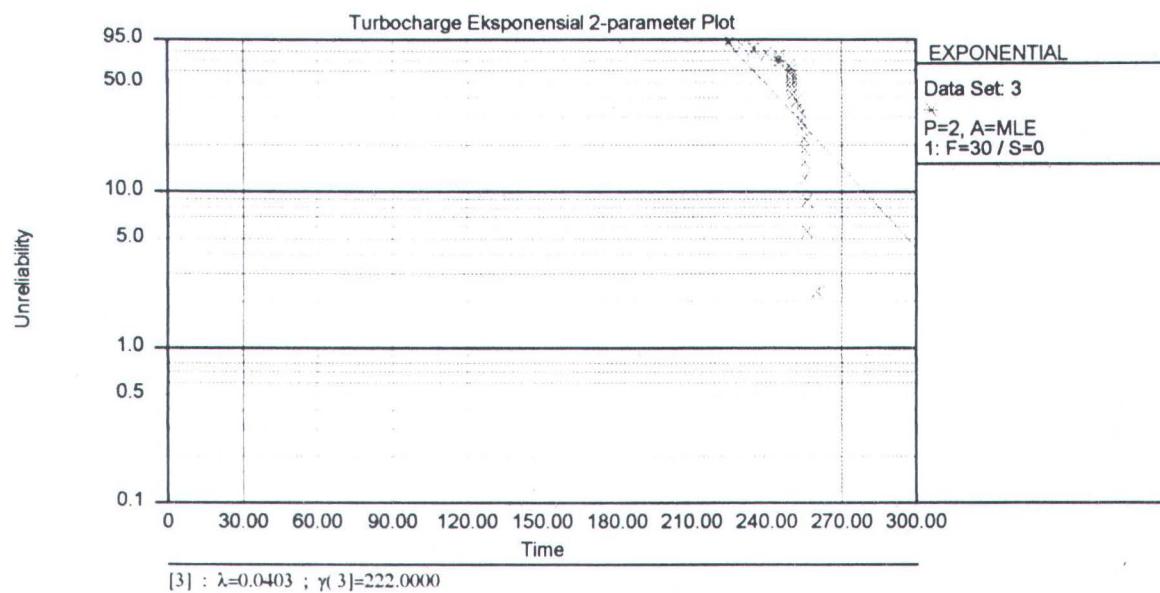
Gambar C.7b.  
Grafik Reliability untuk Pipa Sea Water



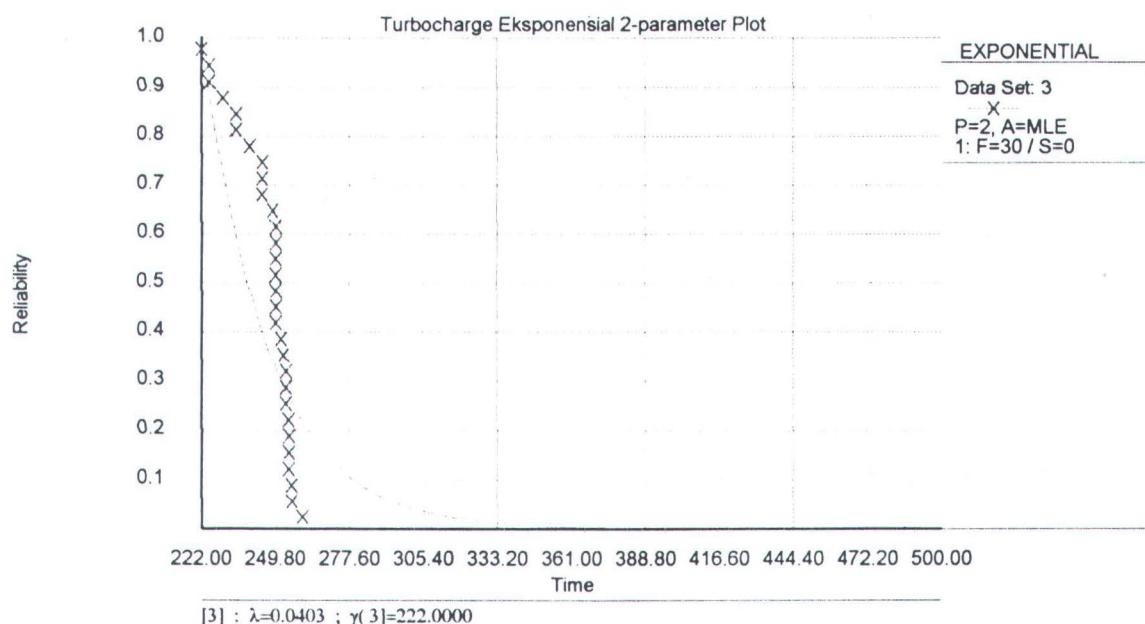
Gambar C.7c.  
Grafik Failure Rate untuk Pipa Sea Water



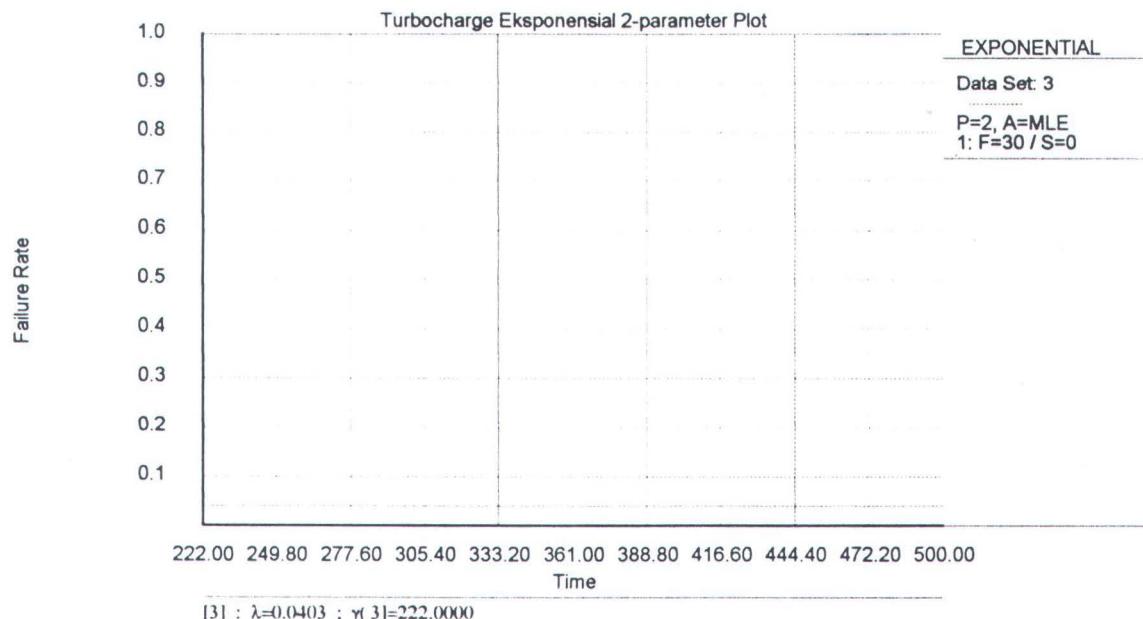
Gambar C.7d.  
Grafik Probability Density Function untuk Pipa Sea Water



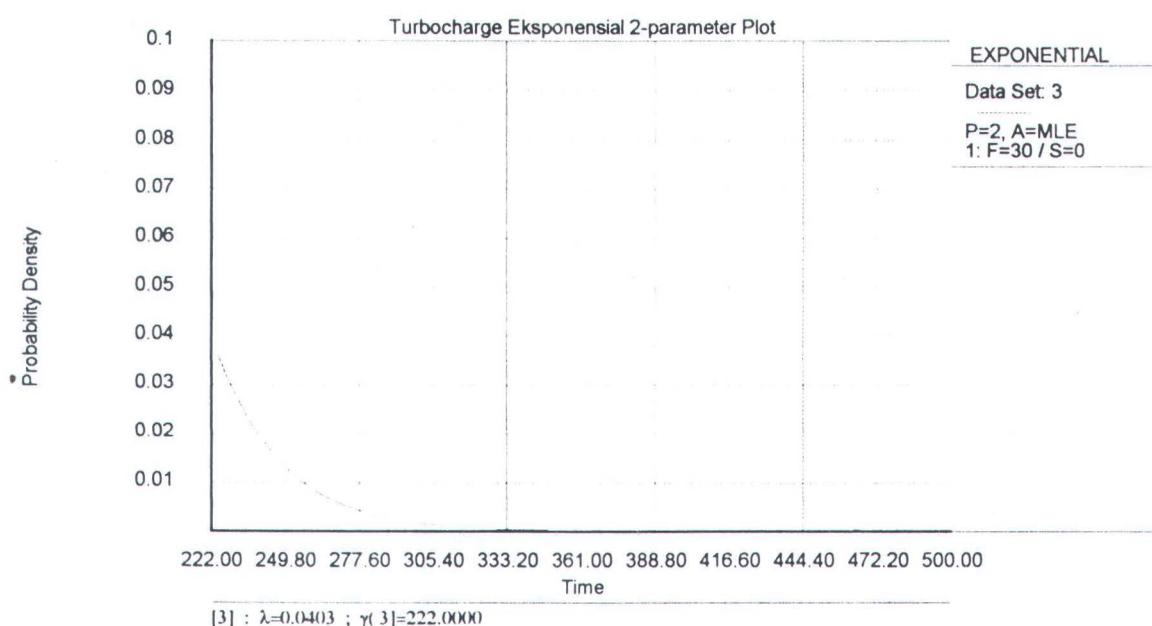
Gambar C.8a.  
Grafik Unreliability untuk Turbocharger



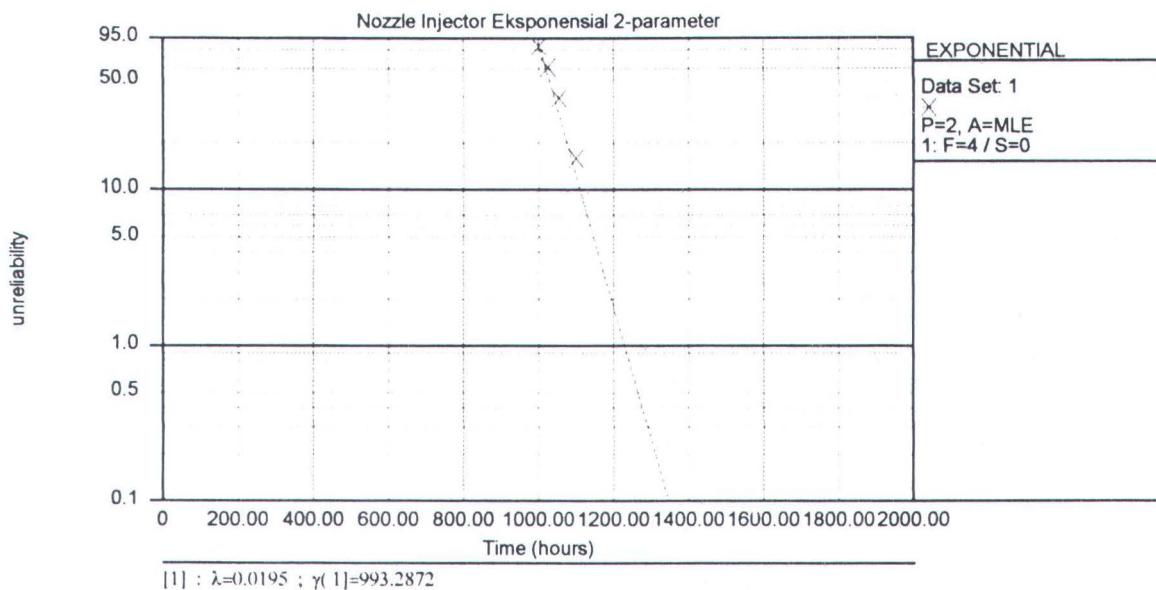
Gambar C.8b.  
Grafik Reliability untuk Turbocharger



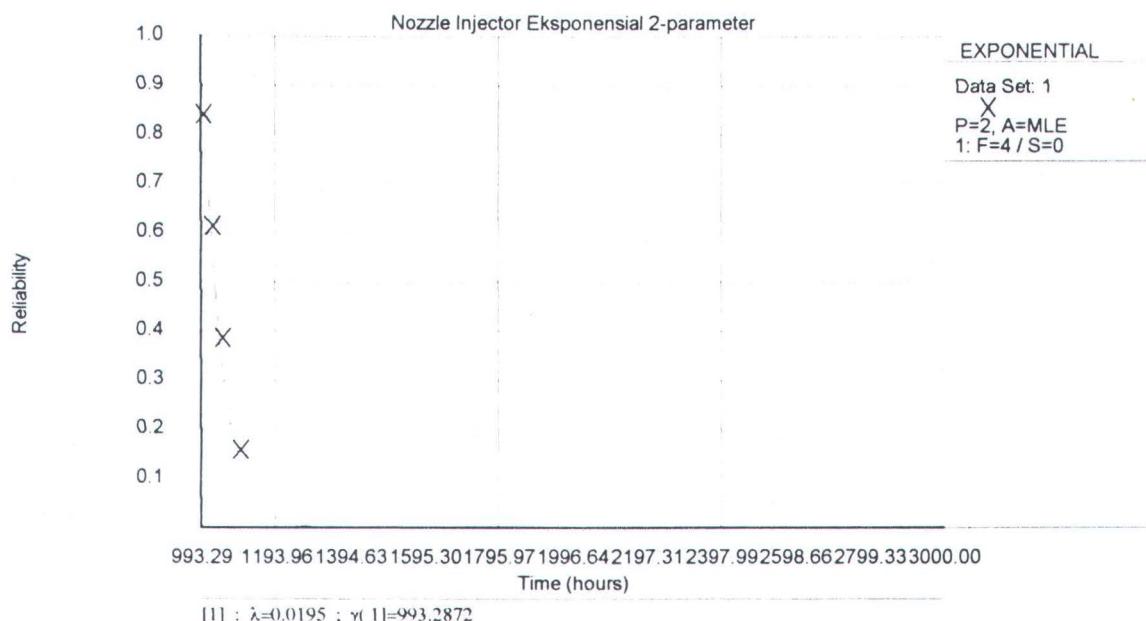
Gambar C.8c.  
Grafik Failure Rate untuk Turbocharger



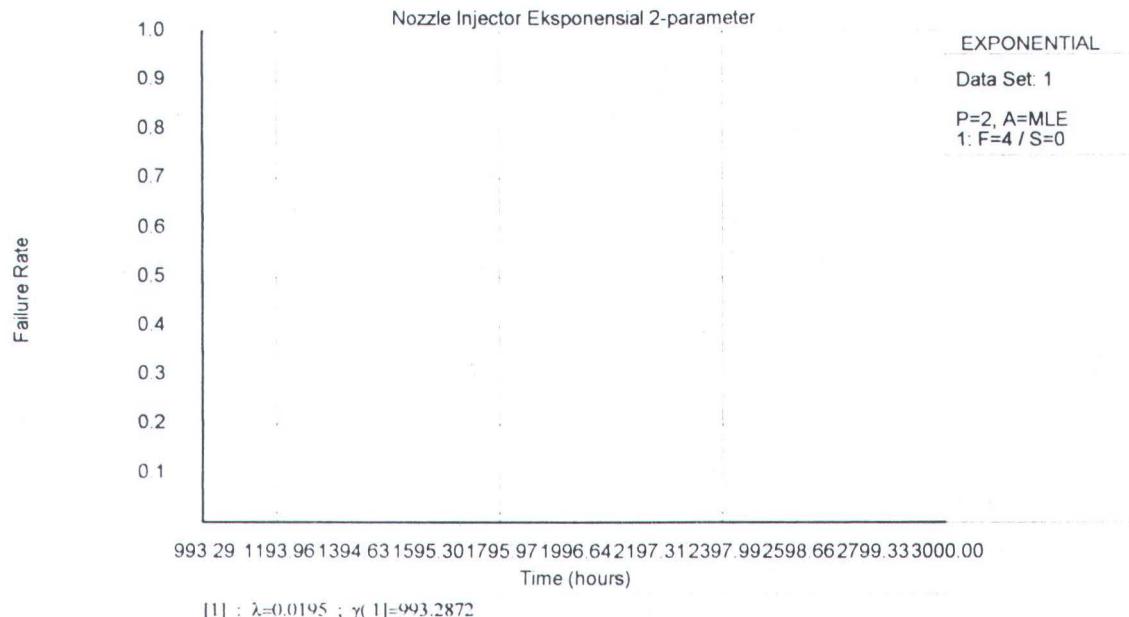
Gambar C.8d.  
Grafik Probability Density Function untuk Turbocharger



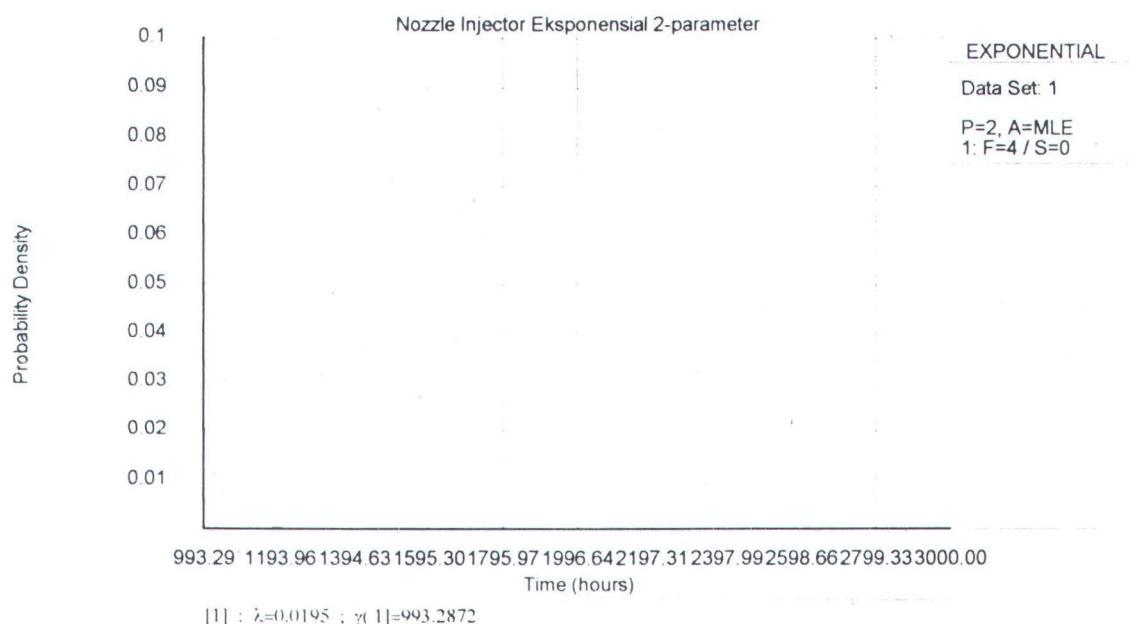
Gambar C.9a.  
*Grafik Unreliability untuk Nozzle Injector*



Gambar C.9b.  
*Grafik Reliability untuk Nozzle Injector*



Gambar C.9c.  
Grafik Failure Rate untuk Nozzle Injector



Gambar C.9d  
Grafik Probability Density Function untuk Nozzle Injector

## HASIL PRINT OUT SOFTWARE WEIBULL ++ METODE MLE

### 1. FO FILTER

Current Results Matrix

Matrix Order:

DISTRIBUTION      Ranking

Exponential 1 6

Exponential 2 4

Normal      5

Lognormal      1

Weibull 2      3

Weibull 3      2

Calculation Results:

Step 1

Initilazing Data.....

Calculating! One parameter Exponential

Lambda=0.0013

Done.. Exponential 1

Calculating! Two parameter Exponential

Lambda=0.0033

Gamma=474.4287

Done.. Exponential 2

Calculating! Normal

Mean=775.8462

Std=265.0831

Done.. Normal

Calculating! LogNormal

LMean=6.6029

LStd=0.3113

Done.. LogNormal

Calculating! Two parameter Weibull

Beta=3.0020

Eta=867.9351

Done.. Weibull 2

Calculating! Three parameter Weibull

Beta=1.2274

Eta=346.0432

Gamma=452.6000

Done.. Weibull 3

Comments during Calculations:

Step 3 is completed!

Column 1 presents the ranking of my choices.

You may press <Implement Suggestion> to implement the top ranking choice.

END OF RELIASOFT'S DISTRIBUTION WIZARD'S REPORT

## 2. NOZZLE INJECTOR

Current Results Matrix

Matrix Order:

DISTRIBUTION      Ranking

Exponential 1 5

Exponential 2 1

Normal      3

Lognormal      3

Weibull 2      4

Weibull 3      2

Calculation Results:

Step 1

Initilazing Data.....

Calculating! One parameter Exponential

Lambda=0.0010

Done.. Exponential 1

Calculating! Two parameter Exponential

Lambda=0.0195

Gamma=993.2872

Done.. Exponential 2

Calculating! Normal

Mean=1044.5000

Std=37.1248

Done.. Normal

Calculating! LogNormal

LMean=6.9507

LStd=0.0353

Done.. LogNormal

Calculating! Two parameter Weibull

Beta=29.3439

Eta=1062.9737

Large Beta... Ignoring as per User Setup!

Done.. Weibull 2

Calculating! Three parameter Weibull

Beta=1.9082

Eta=75.7121

Gamma=977.6000

Done.. Weibull 3

Comments during Calculations:

Step 3 is completed!

Column 1 presents the ranking of my choices.

You may press <Implement Suggestion> to implement the top ranking choice.

END OF RELIASOFT'S DISTRIBUTION WIZARD'S REPORT

### 3. LO FILTER

Current Results Matrix

Matrix Order:

DISTRIBUTION	AvGOF	AvPlot	LKV
Exponential 1	100.0000	25.2246	-637.0291
Exponential 2	100.0000	23.6481	-578.1248

Normal	100.0000	21.0455	-526.5378
Lognormal	100.0000	20.3895	-505.5546
Weibull 2	100.0000	21.4981	-544.9454
Weibull 3	100.0000	21.1756	-529.9601

Calculation Results:

Step 1

Initilazing Data.....

Calculating! One parameter Exponential

Lambda=0.0020

Done.. Exponential 1

Calculating! Two parameter Exponential

Lambda=0.0038

Gamma=250.0000

Done.. Exponential 2

Calculating! Normal

Mean=512.3295

Std=96.0094

Done.. Normal

Calculating! LogNormal

LMean=6.2263

LStd=0.1495

Done.. LogNormal

Calculating! Two parameter Weibull

Beta=4.0403

Eta=553.3819

Done.. Weibull 2

Calculating! Three parameter Weibull

Beta=2.5936

Eta=308.1932

Gamma=234.4750

Done.. Weibull 3

Comments during Calculations:

Step 1 is completed!

The first three columns show the results.

The first column is the average Goodness of Fit, (AVGOF)

larger values indicate a bad fit.

The second column is a normalized measure of how well the plotted values fit (AVPLOT).

The third column is the value of the likelihood function using the parameters calculated (LKV).

The last column is a view of the Decision Array used (DESAR).

Comments and other results during calculations, can be found on the next page.

END OF RELIASOFT'S DISTRIBUTION WIZARD'S REPORT

#### 4. LO CARTER

Current Results Matrix

Matrix Order:

DISTRIBUTION      Ranking

Exponential 1 5

Exponential 2 4

Normal      1

Lognormal      3

Weibull 2      2

Weibull 3      2

Calculation Results:

Step 1

Initilazing Data.....

Calculating! One parameter Exponential

Lambda=0.0020

Done.. Exponential 1

Calculating! Two parameter Exponential

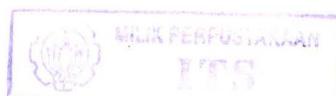
Lambda=0.0128

Gamma=419.0000

Done.. Exponential 2

Calculating! Normal

Mean=496.9574



Std=24.0867

Done.. Normal

Calculating! LogNormal

LMean=6.2073

LStd=0.0493

Done.. LogNormal

Calculating! Two parameter Weibull

Beta=20.7434

Eta=508.0828

Large Beta... Ignoring as per User Setup!

Done.. Weibull 2

Calculating! Three parameter Weibull

Beta=11.3467

Eta=273.8847

Gamma=233.6925

Done.. Weibull 3

Comments during Calculations:

Step 3 is completed!

Column 1 presents the ranking of my choices.

You may press <Implement Suggestion> to implement the top ranking choice.

END OF RELIASOFT'S DISTRIBUTION WIZARD'S REPORT

## 5. FW COOLER

Current Results Matrix

Matrix Order:

DISTRIBUTION      Ranking

Exponential 1 5

Exponential 2 4

Normal      2  
Lognormal      3

Weibull 2      1

Weibull 3      6

Calculation Results:

Step 1

Initilazing Data.....

Calculating! One parameter Exponential

Lambda=0.0020

Done.. Exponential 1

Calculating! Two parameter Exponential

Lambda=0.0044

Gamma=266.0000

Done.. Exponential 2

Calculating! Normal

Mean=494.4921

Std=44.8730

Done.. Normal

Calculating! LogNormal

LMean=6.1980

LStd=0.1138

Done.. LogNormal

Calculating! Two parameter Weibull

Beta=14.4242

Eta=509.6912

Done.. Weibull 2

Calculating! Three parameter Weibull

Beta=0.0000

Eta=27111.2781

Gamma=-26586.5999

Negative Gamma.. Ignoring as per User Setup!

Done.. Weibull 3

Comments during Calculations:

Step 3 is completed!

Column 1 presents the ranking of my choices.

You may press <Implement Suggestion> to implement the top ranking choice.

END OF RELIASOFT'S DISTRIBUTION WIZARD'S REPORT

## 6. LO COOLER

Current Results Matrix

Matrix Order:

DISTRIBUTION Ranking

Exponential 1 4

Exponential 2 4

Normal 2

Lognormal 3

Weibull 2 1

Weibull 3 5

Calculation Results:

Step 1

Initilazing Data.....

Calculating! One parameter Exponential

Lambda=0.0020

Done.. Exponential 1

Calculating! Two parameter Exponential

Lambda=0.0041

Gamma=250.0000

Done.. Exponential 2

Calculating! Normal

Mean=491.2647

Std=80.1969

Done.. Normal

Calculating! LogNormal

LMean=6.1795

LStd=0.2008

Done.. LogNormal

Calculating! Two parameter Weibull

Beta=8.4087

Eta=520.7272

Done.. Weibull 2

Calculating! Three parameter Weibull  
Beta=0.0000  
Eta=25520.8567  
Gamma=-24987.3999  
Negative Gamma.. Ignoring as per User Setup!  
Done.. Weibull 3

Comments during Calculations:  
Step 3 is completed!  
Column 1 presents the ranking of my choices.  
You may press <Implement Suggestion> to implement the top ranking choice.

END OF RELIASOFT'S DISTRIBUTION WIZARD'S REPORT

## 7. INTERCOOLER

Current Results Matrix  
Matrix Order:

DISTRIBUTION	AvGOF	AvPlot	LKV
Exponential 1	98.1234	25.3660	-57.7048
Exponential 2	54.3640	14.0718	-27.3628
Normal	1.4883	8.2654	-25.4199
Lognormal	1.8824	8.2487	-25.4279

Calculation Results:  
Select the distributions you would like me to consider from above. In addition you may also select the action you would like me to take, after my selection, from the Options for Results box.

Comments during Calculations:  
Welcome to the Distribution Wizard  
Press Next Step to proceed a step at a time,  
or press Auto Run for an automatic Run!

END OF RELIASOFT'S DISTRIBUTION WIZARD'S REPORT

## 8. PIPA PENDINGIN SEA WATER

Current Results Matrix

Matrix Order:

DISTRIBUTION	R:AvGOF	R:AvPlot	R:LKV	R:DESARR
Exponential 1	5	400	5	
Exponential 2	1	200	4	
Normal	3	200	2	
Lognormal	2	180	3	
Weibull 2	4	220	1	
Weibull 3	6	480	6	

Calculation Results:

Step 1

Initilazing Data.....

Calculating! One parameter Exponential

Lambda=0.0011

Done.. Exponential 1

Calculating! Two parameter Exponential

Lambda=0.0056

Gamma=750.0000

Done.. Exponential 2

Calculating! Normal

Mean=927.1429

Std=90.9418

Done.. Normal

Calculating! LogNormal

LMean=6.8270

LStd=0.1030

Done.. LogNormal

Calculating! Two parameter Weibull

Beta=14.3838

Eta=965.5522

Done.. Weibull 2

Calculating! Three parameter Weibull

Beta=0.0000  
Eta=66159.0692  
Gamma=-65182.3999  
Negative Gamma.. Ignoring as per User Setup!  
Done.. Weibull 3

Comments during Calculations:

Step 2 is completed!  
The columns represent a ranking, based on the values  
in step 1  
The first column is the GOF ranking.  
The second column is the plot ranking.  
The third column is the Likelihood Ranking.  
The last column is the average decision weight ranking.  
The smallest value is considered the best.

END OF RELIASOFT'S DISTRIBUTION WIZARD'S REPORT

## 9. TURBOCHARGER

Current Results Matrix

Matrix Order:

DISTRIBUTION      Ranking

Exponential 1 4

Exponential 2 3

Normal      1

Lognormal      2

Weibull 2      5

Weibull 3      5

Calculation Results:

Select the distributions you would like me to consider from above. In addition you may also select the action you would like me to take, after my selection, from the Options for Results box.

Comments during Calculations:

Step 3 is completed!

Column 1 presents the ranking of my choices.

You may press <Implement Suggestion> to implement the top ranking choice.

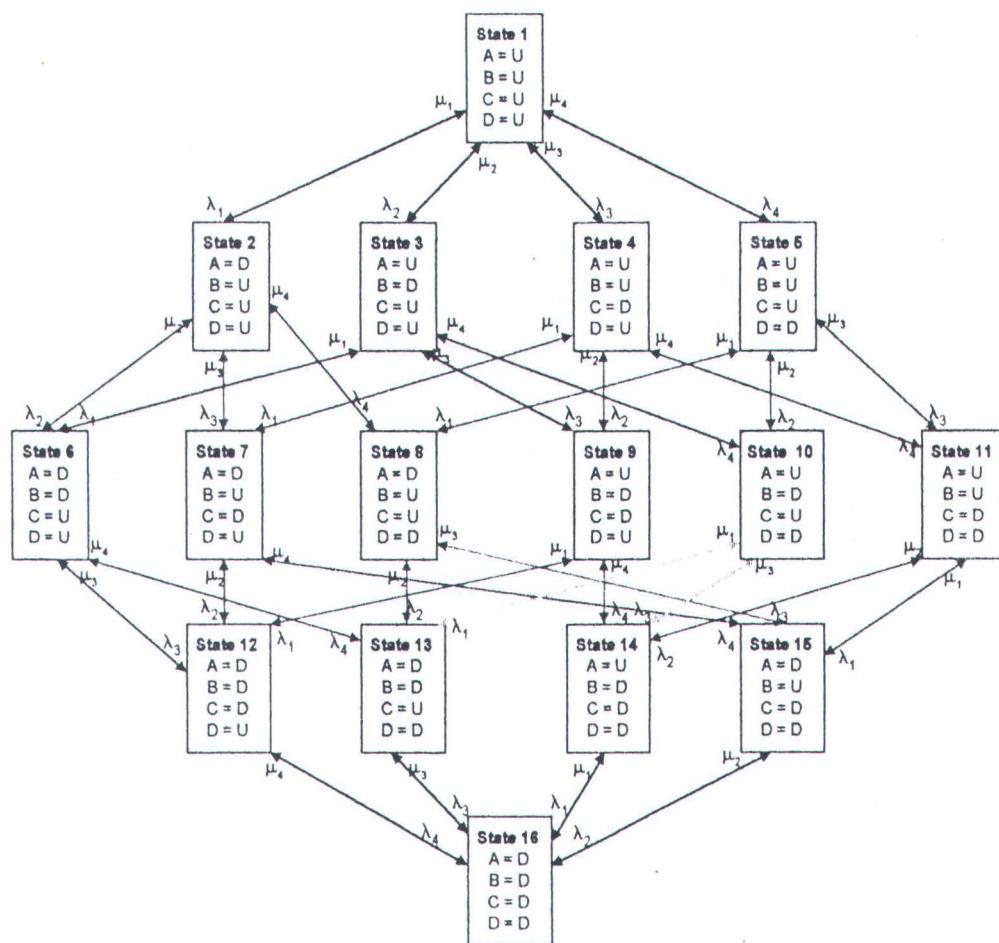
END OF RELIASOFT'S DISTRIBUTION WIZARD'S REPORT

**LAMPIRAN D**

**STATE SPACE DIAGRAM**

## PENGKONSTRUKSIAN STATE SPACE DIAGRAM

### DIESEL GENERATOR



Keterangan : A = FO SYSTEM

$\lambda$  = FAILURE RATE

B = LO SYSTEM

$\mu$  = REPAIR RATE

C = COOLING SYSTEM

U = Sistem Up

D = AUXILIARY ENGINE

D = Sistem Down

## TRANSITION RATE DARI STATE SPACE DIAGRAM

STATE	9	10	11	12	13	14	15	16
1	-	-	-	-	-	-	-	-
2	-	-	-	-	-	-	-	-
3	$\lambda_3$	$\lambda_4$	-	-	-	-	-	-
4	$\lambda_2$	-	$\lambda_4$	-	-	-	-	-
5	-	$\lambda_2$	$\lambda_3$	-	-	-	-	-
6	-	-	-	$\lambda_3$	$\lambda_4$	-	-	-
7	-	-	-	$\lambda_2$	-	-	$\lambda_4$	-
8	-	-	-	-	$\lambda_2$	-	$\lambda_3$	-
9	$1 - (\mu_2 + \mu_3 + \lambda_1 + \lambda_4)$	-	-	$\lambda_1$	-	$\lambda_4$	-	-
10	-	$1 - (\mu_2 + \mu_4 + \lambda_1 + \lambda_3)$	-	-	$\lambda_1$	$\lambda_3$	-	-
11	-	-	$1 - (\mu_3 + \mu_4 + \lambda_1 + \lambda_2)$	-	-	$\lambda_2$	$\lambda_1$	-
12	$\mu_1$	-	-	$1 - (\mu_1 + \mu_2 + \mu_3 + \lambda_4)$	-	-	-	$\lambda_4$
13	-	$\mu_1$	-	-	$1 - (\mu_1 + \mu_2 + \mu_4 + \lambda_3)$	-	-	$\lambda_3$
14	$\mu_4$	$\mu_3$	$\mu_2$	-	-	$1 - (\mu_2 + \mu_3 + \mu_4 + \lambda_1)$	-	$\lambda_1$
15	-	-	$\mu_1$	-	-	-	$1 - (\mu_1 + \mu_3 + \mu_4 + \lambda_2)$	$\lambda_2$
16	-	-	-	$\mu_4$	$\mu_3$	$\mu_1$	$\mu_2$	$1 - (\mu_1 + \mu_2 + \mu_3 + \mu_4)$

## NILAI TRANSITION RATE DARI STATE SPACE DIAGRAM

STATE	9	10	11	12	13	14	15	16
1	-	-	-	-	-	-	-	-
2	-	-	-	-	-	-	-	-
3	0,00337	0,00097	-	-	-	-	-	-
4	0,00662	-	0,00097	-	-	-	-	-
5	-	0,00662	0,00337	-	-	-	-	-
6	-	-	-	0,00337	0,00097	-	-	-
7	-	-	-	0,00662	-	-	0,00097	-
8	-	-	-	-	0,00662	-	0,00337	-
9	0,64638	-	-	0,00225	-	0,00097	-	-
10	-	0,71406	-	-	0,00225	0,00337	-	-
11	-	-	0,71081	-	-	0,00662	0,00225	-
12	0,14016	-	-	0,50847	-	-	-	0,00097
13	-	0,14016	-	-	0,57615	-	-	0,00337
14	0,10512	0,17520	0,17520	-	-	0,54223	-	0,00225
15	-	-	0,14016	-	-	-	0,57290	0,00662
16	-	-	-	0,10512	0,17520	0,14016	0,17520	0,40432



## **LAMPIRAN E**

**MATRIX LIMITING STATE PROBABILITY  
DAN HASIL PERHITUNGAN DENGAN  
SOFTWARE MATLAB**

Persamaan matrix limiting state probability :

$$\alpha P = \alpha$$

$$[P_1 \ P_2 \ P_3 \ P_4 \ P_5 \ P_6 \ P_7 \ P_8 \ P_9 \ P_{10} \ P_{11} \ P_{12} \ P_{13} \ P_{14} \ P_{15} \ P_{16}] \times$$

$$\begin{bmatrix} (-\lambda_1 - \lambda_2 - \lambda_3 - \lambda_4) & \lambda_1 & \lambda_2 & \lambda_3 & \lambda_4 \\ \mu_1 & (-\mu_1 - \lambda_2 - \lambda_3 - \lambda_4) & 0 & 0 & 0 \\ \mu_2 & 0 & (-\mu_2 - \lambda_1 - \lambda_3 - \lambda_4) & 0 & 0 \\ \mu_3 & 0 & 0 & (-\mu_3 - \lambda_1 - \lambda_2 - \lambda_4) & 0 \\ \mu_4 & 0 & 0 & 0 & (-\mu_4 - \lambda_1 - \lambda_2 - \lambda_3) \\ 0 & \mu_2 & \mu_1 & 0 & 0 \\ 0 & \mu_3 & 0 & \mu_1 & 0 \\ 0 & \mu_4 & 0 & 0 & \mu_1 \\ 0 & 0 & \mu_3 & \mu_2 & 0 \\ 0 & 0 & \mu_4 & 0 & \mu_2 \\ 0 & 0 & 0 & \mu_4 & \mu_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Lanjutan...

$$\begin{bmatrix}
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
\lambda^2 & \lambda^3 & \lambda^4 & 0 & 0 & 0 \\
\lambda^1 & 0 & 0 & \lambda^3 & \lambda^4 & 0 \\
0 & \lambda^1 & 0 & 0 & 0 & \lambda^4 \\
0 & 0 & \lambda^1 & 0 & \lambda^2 & \lambda^3 \\
(-\mu^1 - \mu^2 - \lambda^3 - \lambda^4) & 0 & (-\mu^1 - \mu^3 - \lambda^2 - \lambda^4) & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & (-\mu^1 - \mu^4 - \lambda^2 - \lambda^3) & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & (-\mu^2 - \mu^3 - \lambda^1 - \lambda^4) & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (-\mu^2 - \mu^4 - \lambda^1 - \lambda^3) \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
\mu^3 & \mu^2 & 0 & \mu^1 & 0 & 0 \\
\mu^4 & 0 & \mu^2 & 0 & \mu^1 & 0 \\
0 & 0 & 0 & \mu^4 & \mu^3 & \mu^2 \\
0 & 0 & \mu^4 & 0 & 0 & \mu^1 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0
\end{bmatrix}$$

Lanjutan

$$\begin{bmatrix}
 1 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 \\
\lambda 3 & 0 & 0 & 0 \\
\lambda 4 & 0 & 0 & 0 \\
\lambda 2 & 0 & 0 & 0 \\
\lambda 1 & 0 & 0 & 0 \\
(-\mu 1 - \mu 2 - \mu 3 - \mu 4) & 0 & 0 & 0 \\
0 & (-\mu 1 - \mu 2 - \mu 3 - \mu 4 - \lambda 3) & 0 & 0 \\
0 & 0 & (-\mu 2 - \mu 3 - \mu 4 - \lambda 1) & 0 \\
0 & 0 & 0 & (-\mu 1 - \mu 3 - \mu 4 - \lambda 2) \\
\mu 4 & \mu 3 & \mu 1 & \mu 2
\end{bmatrix} = 
\begin{bmatrix}
1 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 1 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 1 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 1 \\
0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 \\
\lambda 4 & 0 & 0 & 0 \\
\lambda 3 & 0 & 0 & 0 \\
\lambda 2 & 0 & 0 & 0 \\
\lambda 1 & 0 & 0 & 0 \\
\lambda 4 & 0 & 0 & 0 \\
\lambda 3 & 0 & 0 & 0 \\
\lambda 2 & 0 & 0 & 0 \\
\lambda 1 & 0 & 0 & 0 \\
1 & 1 & 1 & 1
\end{bmatrix}$$

$$[0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$$

Secara Eksplisit persamaan tersebut diatas dapat dituliskan :

$$(1 - \lambda_1 - \lambda_2 - \lambda_3 - \lambda_4)P_1 + \mu_1 P_2 + \mu_2 P_3 + \mu_3 P_4 + \mu_4 P_5 = P_1 \quad (1a)$$

$$\lambda_1 P_1 + (1 - \mu_1 - \mu_2 - \mu_3 - \mu_4)P_2 + \mu_2 P_6 + \mu_3 P_7 + \mu_4 P_8 = P_2 \quad (2a)$$

$$\lambda_2 P_1 + (1 - \mu_2 - \lambda_1 - \lambda_3 - \lambda_4)P_3 + \mu_1 P_6 + \mu_3 P_9 + \mu_4 P_{10} = P_3 \quad (3a)$$

$$\lambda_3 P_1 + (1 - \mu_3 - \lambda_1 - \lambda_2 - \lambda_4)P_4 + \mu_1 P_7 + \mu_2 P_9 + \mu_4 P_{11} = P_4 \quad (4a)$$

$$\lambda_4 P_1 + (1 - \mu_4 - \lambda_1 - \lambda_2 - \lambda_3)P_5 + \mu_1 P_8 + \mu_2 P_{10} + \mu_3 P_{11} = P_5 \quad (5a)$$

$$\lambda_2 P_2 + \lambda_1 P_3 + (1 - \mu_1 - \mu_2 - \lambda_3 - \lambda_4)P_6 + \mu_3 P_{12} + \mu_4 P_{13} = P_6 \quad (6a)$$

$$\lambda_3 P_2 + \lambda_1 P_4 + (1 - \mu_1 - \mu_3 - \lambda_2 - \lambda_4)P_7 + \mu_2 P_{12} + \mu_4 P_{15} = P_7 \quad (7a)$$

$$\lambda_4 P_2 + \lambda_1 P_5 + (1 - \mu_1 - \mu_4 - \lambda_2 - \lambda_3)P_8 + \mu_2 P_{13} + \mu_3 P_{15} = P_8 \quad (8a)$$

$$\lambda_3 P_3 + \lambda_2 P_4 + (1 - \mu_2 - \mu_3 - \lambda_1 - \lambda_4)P_9 + \mu_1 P_{12} + \mu_4 P_{14} = P_9 \quad (9a)$$

$$\lambda_4 P_3 + \lambda_2 P_5 + (1 - \mu_2 - \mu_4 - \lambda_1 - \lambda_3)P_{10} + \mu_1 P_{13} + \mu_3 P_{14} = P_{10} \quad (10a)$$

$$\lambda_4 P_4 + \lambda_3 P_5 + (1 - \mu_3 - \mu_4 - \lambda_1 - \lambda_2)P_{11} + \mu_2 P_{14} + \mu_1 P_{15} = P_{11} \quad (11a)$$

$$\lambda_3 P_6 + \lambda_2 P_7 + \lambda_1 P_9 + (1 - \mu_1 - \mu_2 - \mu_3 - \lambda_4)P_{12} + \mu_4 P_{16} = P_{12} \quad (12a)$$

$$\lambda_4P_6 + \lambda_2P_8 + \lambda_1P_{10} + (1 - \mu_1 - \mu_2 - \mu_4 - \lambda_3)P_{13} + \mu_3P_{16} = P_{13} \quad (13a)$$

$$\lambda_4P_9 + \lambda_3P_{10} + \lambda_2P_{11} + (1 - \mu_2 - \mu_3 - \mu_4 - \lambda_1)P_{14} + \mu_1P_{16} = P_{14} \quad (14a)$$

$$\lambda_4P_7 + \lambda_3P_8 + \lambda_1P_{11} + (1 - \mu_1 - \mu_3 - \mu_4 - \lambda_2)P_{15} + \mu_2P_{16} = P_{15} \quad (15a)$$

Hasil perubahan susunan persamaan :

$$(-\lambda_1 - \lambda_2 - \lambda_3 - \lambda_4)P_1 + \mu_1P_2 + \mu_2P_3 + \mu_3P_4 + \mu_4P_5 = 0 \quad (1b)$$

$$\lambda_1P_1 + (-\mu_1 - \lambda_2 - \lambda_3 - \lambda_4)P_2 + \mu_2P_6 + \mu_3P_7 + \mu_4P_8 = 0 \quad (2b)$$

$$\lambda_2P_1 + (-\mu_2 - \lambda_1 - \lambda_3 - \lambda_4)P_3 + \mu_1P_6 + \mu_3P_9 + \mu_4P_{10} = 0 \quad (3b)$$

$$\lambda_3P_1 + (-\mu_3 - \lambda_1 - \lambda_2 - \lambda_4)P_4 + \mu_1P_7 + \mu_2P_9 + \mu_4P_{11} = 0 \quad (4b)$$

$$\lambda_4P_1 + (-\mu_4 - \lambda_1 - \lambda_2 - \lambda_3)P_5 + \mu_1P_8 + \mu_2P_{10} + \mu_3P_{11} = 0 \quad (5b)$$

$$\lambda_2P_2 + \lambda_1P_3 + (-\mu_1 - \mu_2 - \lambda_3 - \lambda_4)P_6 + \mu_3P_{12} + \mu_4P_{13} = 0 \quad (6b)$$

$$\lambda_3P_2 + \lambda_1P_4 + (-\mu_1 - \mu_3 - \lambda_2 - \lambda_4)P_7 + \mu_2P_{12} + \mu_4P_{15} = 0 \quad (7b)$$

$$\lambda_4P_2 + \lambda_1P_5 + (-\mu_1 - \mu_4 - \lambda_2 - \lambda_3)P_8 + \mu_2P_{13} + \mu_3P_{15} = 0 \quad (8b)$$

$$\lambda_3P_3 + \lambda_2P_4 + (-\mu_2 - \mu_3 - \lambda_1 - \lambda_4)P_9 + \mu_1P_{12} + \mu_4P_{14} = 0 \quad (9b)$$

$$\lambda_4 P_3 + \lambda_2 P_5 + (-\mu_2 - \mu_4 - \lambda_1 - \lambda_3)P_{10} + \mu_1 P_{13} + \mu_3 P_{14} = 0 \quad (10b)$$

$$\lambda_4 P_4 + \lambda_3 P_5 + (-\mu_3 - \mu_4 - \lambda_1 - \lambda_2)P_{11} + \mu_2 P_{14} + \mu_1 P_{15} = 0 \quad (11b)$$

$$\lambda_3 P_6 + \lambda_2 P_7 + \lambda_1 P_9 + (-\mu_1 - \mu_2 - \mu_3 - \lambda_4)P_{12} + \mu_4 P_{16} = 0 \quad (12b)$$

$$\lambda_4 P_6 + \lambda_2 P_8 + \lambda_1 P_{10} + (-\mu_1 - \mu_2 - \mu_4 - \lambda_3)P_{13} + \mu_3 P_{16} = 0 \quad (13b)$$

$$\lambda_4 P_9 + \lambda_3 P_{10} + \lambda_2 P_{11} + (-\mu_2 - \mu_3 - \mu_4 - \lambda_1)P_{14} + \mu_1 P_{16} = 0 \quad (14b)$$

$$\lambda_4 P_7 + \lambda_3 P_8 + \lambda_1 P_{11} + (-\mu_1 - \mu_3 - \mu_4 - \lambda_2)P_{15} + \mu_2 P_{16} = 0 \quad (15b)$$

$$P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6 + P_7 + P_8 + P_9 + P_{10} + P_{11} + P_{12} + P_{13} + P_{14} + P_{15} + P_{16} = 1 \quad (16)$$

Selanjutnya persamaan ini diselesaikan dengan software Matlab (Lihat lampiran selanjutnya)

MATRIX LIMITING STATE PROBABILITY

STATE	1	2	3	4	5	6	7	8
1	$(-\lambda_1 - \lambda_2 - \lambda_3 - \lambda_4)$	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	$\lambda_4$	0	0	0
2	$\mu_1$	$(-\mu_1 - \mu_2 - \mu_3 - \mu_4)$	0	0	0	$\lambda_2$	$\lambda_3$	$\lambda_4$
3	$\mu_2$	0	$(-\mu_2 - \lambda_1 - \lambda_3 - \lambda_4)$	0	0	$\lambda_1$	0	0
4	$\mu_3$	0	0	$(-\mu_3 - \lambda_1 - \lambda_2 - \lambda_4)$	0	0	$\lambda_1$	0
5	$\mu_4$	0	0	0	$(-\mu_4 - \lambda_1 - \lambda_2 - \lambda_3)$	0	0	$\lambda_1$
6	0	$\mu_2$	$\mu_1$	0	0	$(-\mu_1 - \mu_2 - \lambda_3 - \lambda_4)$	0	0
7	0	$\mu_3$	0	$\mu_1$	0	0	$(-\mu_1 - \mu_3 - \lambda_2 - \lambda_4)$	0
8	0	$\mu_4$	0	0	$\mu_1$	0	0	$(-\mu_1 - \mu_4 - \lambda_2 - \lambda_3)$
9	0	0	$\mu_3$	$\mu_2$	0	0	0	0
10	0	0	$\mu_4$	0	$\mu_2$	0	0	0
11	0	0	0	$\mu_4$	$\mu_3$	0	0	0
12	0	0	0	0	0	$\mu_3$	$\mu_2$	0
13	0	0	0	0	0	$\mu_4$	0	$\mu_2$
14	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	$\mu_4$	$\mu_3$
16	0	0	0	0	0	0	0	0

STATE	9	10	11	12	13	14	15	16
1	0	0	0	0	0	0	0	1
2	0	0	0	0	0	0	0	1
3	$\lambda_3$	$\lambda_4$	0	0	0	0	0	1
4	$\lambda_2$	0	$\lambda_4$	0	0	0	0	1
5	0	$\lambda_2$	$\lambda_3$	0	0	0	0	1
6	0	0	0	$\lambda_3$	$\lambda_4$	0	0	1
7	0	0	0	$\lambda_2$	0	0	$\lambda_4$	1
8	0	0	0	0	$\lambda_2$	0	$\lambda_3$	1
9	$(-\mu_2 - \mu_3 - \lambda_1 - \lambda_4)$	0	0	$\lambda_1$	0	$\lambda_4$	0	1
10	0	$(-\mu_2 - \mu_4 - \lambda_1 - \lambda_3)$	0	0	$\lambda_1$	$\lambda_3$	0	1
11	0	0	$(-\mu_3 - \mu_4 - \lambda_1 - \lambda_2)$	0	0	$\lambda_2$	$\lambda_1$	1
12	$\mu_1$	0	0	$(-\mu_1 - \mu_2 - \mu_3 - \lambda_4)$	0	0	0	1
13	0	$\mu_1$	0	0	$(-\mu_1 - \mu_2 - \mu_4 - \lambda_3)$	0	0	1
14	$\mu_4$	$\mu_3$	$\mu_2$	0	0	$(-\mu_2 - \mu_3 - \mu_4 - \lambda_1)$	0	1
15	0	0	$\mu_1$	0	0	0	$(-\mu_1 - \mu_3 - \mu_4 - \lambda_2)$	1
16	0	0	0	$\mu_4$	$\mu_3$	$\mu_1$	$\mu_2$	1

NILAI MATRIX LIMITING STATE PROBABILITY

STATE	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-0,01321	0,00225	0,00662	0,00337	0,00097	0	0	0
2	0,14016	-0,15112	0	0	0	0,00662	0,00337	0,00097
3	0,17520	0	-0,18179	0	0	0,00225	0	0
4	0,17520	0	0	-0,18504	0	0	0,00225	0
5	0,10512	0	0	0	-0,11736	0	0,00000	0,00225
6	0	0,17520	0,14016	0	0	-0,31970	0	0
7	0	0,17520	0	0,14016	0	0	-0,32295	0
8	0	0,10512	0	0	0,14016	0	0	-0,25527
9	0	0	0,17520	0,17520	0	0	0	0
10	0	0	0,10512	0	0,17520	0	0	0
11	0	0	0	0,10512	0,17520	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0,17520	0,17520	0
13	0	0	0	0	0	0,10512	0	0,17520
14	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0,10512	0,17520
16	0	0	0	0	0	0	0	0

STATE	9	10	11	12	13	14	15	16
1	0	0	0	0	0	0	0	1
2	0	0	0	0	0	0	0	1
3	0,00337	0,00097	0	0	0	0	0	1
4	0,00662	0	0,00097	0	0	0	0	1
5	0	0,00662	0,00337	0	0	0	0	1
6	0	0	0	0,00337	0,00097	0	0	1
7	0	0	0	0,00662	0	0	0,00097	1
8	0	0	0	0	0,00662	0	0,00337	1
9	-0,35362	0	0	0,00225	0	0,00097	0	1
10	0	-0,28594	0	0	0,00225	0,00337	0	1
11	0	0	-0,28919	0	0	0,00662	0,00225	1
12	0,14016	0	0	-0,49153	0	0	0	1
13	0	0,14016	0	0	-0,42385	0	0	1
14	0,10512	0,17520	0,17520	0	0	-0,45777	0	1
15	0	0	0,14016	0	0	0	-0,42710	1
16	0	0	0	0,10512	0,17520	0,14016	0,17520	1

## HASIL PERHITUNGAN LIMITING STATE PROBABILITY MATRIX

$A = [-0.01321 \ 0.00225 \ 0.00662 \ 0.00337 \ 0.00097 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1;$   
 $0.14016 \ -0.15112 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0.00662 \ 0.00337 \ 0.00097 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1;$   
 $0.17520 \ 0 \ -0.18179 \ 0 \ 0 \ 0.00225 \ 0 \ 0 \ 0.00337 \ 0.00097 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1;$   
 $0.17520 \ 0 \ 0 \ -0.18504 \ 0 \ 0 \ 0.00225 \ 0 \ 0.00662 \ 0 \ 0.00097 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1;$   
 $0.10512 \ 0 \ 0 \ 0 \ -0.11736 \ 0 \ 0 \ 0.00225 \ 0 \ 0.00662 \ 0.00337 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1;$   
 $0 \ 0.17520 \ 0.14016 \ 0 \ 0 \ -0.31970 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0.00337 \ 0.00097 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1;$   
 $0 \ 0.17520 \ 0 \ 0.14016 \ 0 \ 0 \ -0.32295 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0.00662 \ 0 \ 0 \ 0.00097 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1;$   
 $0 \ 0.10512 \ 0 \ 0 \ 0.14016 \ 0 \ 0 \ -0.25527 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0.00662 \ 0 \ 0.00337 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1;$   
 $0 \ 0 \ 0.17520 \ 0.17520 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ -0.35362 \ 0 \ 0 \ 0.00225 \ 0 \ 0.00097 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1;$   
 $0 \ 0 \ 0 \ 0.10512 \ 0.17520 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ -0.28594 \ 0 \ 0 \ 0.00225 \ 0.00337 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1;$   
 $0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0.10512 \ 0.17520 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ -0.28919 \ 0 \ 0 \ 0.00662 \ 0.00225 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1;$   
 $0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0.17520 \ 0.17520 \ 0 \ 0.14016 \ 0 \ 0 \ -0.49153 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1;$   
 $0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0.10512 \ 0 \ 0.17520 \ 0 \ 0.14016 \ 0 \ 0 \ -0.42385 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1;$   
 $0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0.10512 \ 0.17520 \ 0.17520 \ 0 \ 0 \ -0.45777 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1;$   
 $0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0.10512 \ 0.17520 \ 0 \ 0 \ 0.14016 \ 0 \ 0 \ 0 \ -0.42710 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1;$   
 $0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0.10512 \ 0.17520 \ 0.14016 \ 0.17520 \ 1]$

$A =$

Columns 1 through 7

-0.0132	0.0022	0.0066	0.0034	0.0010	0	0
0.1402	-0.1511	0	0	0	0.0066	0.0034
0.1752	0	-0.1818	0	0	0.0022	0
0.1752	0	0	-0.1850	0	0	0.0022
0.1051	0	0	0	-0.1174	0	0
0	0.1752	0.1402	0	0	-0.3197	0
0	0.1752	0	0.1402	0	0	-0.3230
0	0.1051	0	0	0.1402	0	0
0	0	0.1752	0.1752	0	0	0
0	0	0.1051	0	0.1752	0	0
0	0	0	0	0	0.1752	0.1752
0	0	0	0	0	0.1051	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0.1051
0	0	0	0	0	0	0

Columns 8 through 14

0	0	0	0	0	0	0
0.0010	0	0	0	0	0	0
0	0.0034	0.0010	0	0	0	0
0	0.0066	0	0.0010	0	0	0

0.0022	0	0.0066	0.0034	0	0	0
0	0	0	0	0.0034	0.0010	0
0	0	0	0	0.0066	0	0
-0.2553	0	0	0	0	0.0066	0
0	-0.3536	0	0	0.0022	0	0.0010
0	0	-0.2859	0	0	0.0022	0.0034
0	0	0	-0.2892	0	0	0.0066
0	0.1402	0	0	-0.4915	0	0
0.1752	0	0.1402	0	0	-0.4239	0
0	0.1051	0.1752	0.1752	0	0	-0.4578
0.1752	0	0	0.1402	0	0	0
0	0	0	0	0.1051	0.1752	0.1402

Columns 15 through 16

0	1.0000
0	1.0000
0	1.0000
0	1.0000
0	1.0000
0	1.0000
0.0010	1.0000
0.0034	1.0000
0	1.0000
0	1.0000
0.0022	1.0000
0	1.0000
0	1.0000
0	1.0000
-0.4271	1.0000
0.1752	1.0000

» B=A'

B =

Columns 1 through 7

-0.0132	0.1402	0.1752	0.1752	0.1051	0	0
0.0022	-0.1511	0	0	0	0.1752	0.1752
0.0066	0	-0.1818	0	0	0.1402	0
0.0034	0	0	-0.1850	0	0	0.1402
0.0010	0	0	0	-0.1174	0	0
0	0.0066	0.0022	0	0	-0.3197	0
0	0.0034	0	0.0022	0	0	-0.3230
0	0.0010	0	0	0.0022	0	0
0	0	0.0034	0.0066	0	0	0

0	0	0.0010	0	0.0066	0	0
0	0	0	0.0010	0.0034	0	0
0	0	0	0	0	0.0034	0.0066
0	0	0	0	0	0.0010	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0.0010
1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000

## Columns 8 through 14

0	0	0	0	0	0	0
0.1051	0	0	0	0	0	0
0	0.1752	0.1051	0	0	0	0
0	0.1752	0	0.1051	0	0	0
0.1402	0	0.1752	0.1752	0	0	0
0	0	0	0	0.1752	0.1051	0
0	0	0	0	0.1752	0	0
-0.2553	0	0	0	0	0.1752	0
0	-0.3536	0	0	0.1402	0	0.1051
0	0	-0.2859	0	0	0.1402	0.1752
0	0	0	-0.2892	0	0	0.1752
0	0.0022	0	0	-0.4915	0	0
0.0066	0	0.0022	0	0	-0.4239	0
0	0.0010	0.0034	0.0066	0	0	-0.4578
0.0034	0	0	0.0022	0	0	0
1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000

## Columns 15 through 16

0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0.1051	0
0.1752	0
0	0
0	0
0.1402	0
0	0.1051
0	0.1752
0	0.1402
-0.4271	0.1752
1.0000	1.0000

» C=[0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;1]

C =

0  
0  
0  
0  
0  
0  
0  
0  
0  
0  
0  
0  
0  
0  
1

» P=inv(B)\*C

P =

0.9220  
0.0148  
0.0348  
0.0177  
0.0085  
0.0006  
0.0003  
0.0001  
0.0007  
0.0003  
0.0002  
0.0000  
0.0000  
0.0000  
0.0000

