



TUGAS AKHIR – TI 184833

**ANALISIS KEANDALAN SISTEM PABRIK PHONSKA IV  
PT PETROKIMIA GRESIK DENGAN PENDEKATAN DISTRIBUSI  
*PHASE-TYPE***

NAURAH RAFA  
NRP. 02411640000218

DOSEN PEMBIMBING:  
Stefanus Eko Wiratno, S.T., M.T.  
NIP. 197103171998021001

DEPARTEMEN TEKNIK SISTEM DAN INDUSTRI  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI DAN REKAYASA SISTEM  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2020





TUGAS AKHIR – TI 184833

**ANALISIS KEANDALAN SISTEM PABRIK PHONSKA IV  
PT PETROKIMIA GRESIK DENGAN PENDEKATAN  
DISTRIBUSI *PHASE-TYPE***

NAURAH RAFA

NRP 02411640000218

DOSEN PEMBIMBING:

Stefanus Eko Wiratno, S.T., M.T.

NIP. 197103171998021001

DEPARTEMEN TEKNIK SISTEM DAN INDUSTRI

Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2020





FINAL PROJECT – TI 184833

**SYSTEM RELIABILITY ANALYSIS IN PHONSKA IV PLANT  
OF PT PETROKIMIA GRESIK USING PHASE-TYPE  
DISTRIBUTION APPROACH**

NAURAH RAFA

NRP 02411640000218

SUPERVISOR:

Stefanus Eko Wiratno, S.T., M.T.

NIP. 197103171998021001

DEPARTMENT OF INDUSTRIAL SYSTEM AND ENGINEERING

Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2020



**LEMBAR PENGESAHAN**  
**ANALISIS KEANDALAN SISTEM PABRIK PHONSKA IV**  
**PT PETROKIMIA GRESIK DENGAN PENDEKATAN**  
**DISTRIBUSI *PHASE-TYPE***

**TUGAS AKHIR**

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
pada Program Studi S-1 Departemen Teknik Sistem dan Industri  
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

**NAURAH RAFA**  
**NRP 0241164000218**

Disetujui oleh Dosen Pembimbing Tugas Akhir:

  
**Stefanus Eko Wiratno, S.T., M.T.**

**NIP. 197103171998021001**

**SURABAYA, AGUSTUS 2020**



*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*



# ANALISIS KEANDALAN SISTEM PABRIK PHONSKA IV PT PETROKIMIA GRESIK DENGAN PENDEKATAN DISTRIBUSI *PHASE-TYPE*

Nama Mahasiswa : Naurah Rafa  
NRP : 02411640000218  
Pembimbing : Stefanus Eko Wiratno, S.T., M.T.

## ABSTRAK

Penelitian ini membahas mengenai analisis keandalan sistem di Pabrik Phonska IV PT Petrokimia Gresik dalam bentuk fungsi keandalan. Sistem produksi Pabrik Phonska IV terdiri dari 8 subsistem yang terhubung secara seri. Masing-masing subsistem terdiri dari mesin dan peralatan produksi dengan struktur seri, paralel, dan *k-out-of-n*. Struktur sistem digambarkan melalui *reliability block diagram*. Perhitungan keandalan sistem dilakukan dengan menggunakan pendekatan distribusi *phase-type*. *Fitting data time to failure* ke distribusi *phase-type* dilakukan dengan *trace-based fitting* untuk mendapatkan parameter distribusi *phase-type* yang merepresentasikan distribusi teoritis aslinya. *Closure properties* dari distribusi *phase-type* digunakan untuk mendapatkan fungsi keandalan sistem dari fungsi keandalan peralatan yang berdistribusi *phase-type*. Hasil dari penelitian yang dilakukan berupa fungsi keandalan sistem yang berdistribusi *phase-type*. Analisis sensitivitas dilakukan pada peralatan kritis di subsistem kritis yang telah ditentukan melalui *Birnbaum's importance index* dengan menambahkan peralatan *redundant* dan penggantian peralatan. Hasil analisis sensitivitas digunakan untuk memberikan rekomendasi perbaikan sistem untuk meningkatkan keandalan sistem. Skenario perbaikan yang memberikan peningkatan keandalan sistem tertinggi yaitu skenario penerapan struktur *standby perfect switch* dan penggantian peralatan.

**Kata kunci:** Keandalan Sistem, Fungsi Keandalan, *Reliability Block Diagram*, Distribusi *Phase-Type*, Analisis Sensitivitas.

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

# **SYSTEM RELIABILITY ANALYSIS IN PHONSKA IV PLANT OF PT PETROKIMIA GRESIK USING PHASE-TYPE DISTRIBUTION APPROACH**

Name : Naurah Rafa  
NRP : 02411640000218  
Supervisor : Stefanus Eko Wiratno, S.T., M.T.

## **ABSTRACT**

This study discusses about system reliability analysis as a reliability function at the Phonska IV Plant of PT Petrokimia Gresik. The Phonska IV plant production system consists of 8 subsystems connected in series. Each subsystem consists of machines and production equipment with a series, parallel, and k-out-of-n structure. The system structure is described through the reliability block diagram. System reliability calculation is done using a phase-type distribution approach. The fitting of the time to failure data into the phase-type distribution is done by using trace-based fitting to obtain the phase-type distribution parameters that represent the original theoretical distribution. The closure properties of the phase-type distribution are used to obtain system reliability function with a phase-type distribution. The result of the research conducted is the system reliability function with a phase-type distribution. Sensitivity analysis is performed on critical equipment in a predetermined critical subsystem through Birnbaum's importance index by adding redundant equipment and equipment replacement. The results of the sensitivity analysis are used to provide recommendations for system improvements to increase system reliability. Improvement scenarios that provide the highest increase in system reliability are the scenario of implementing the standby perfect switch structure and equipment replacement.

**Key Word:** System Reliability, Reliability Function, Reliability Block Diagram, Phase-Type Distribution, Sensitivity Analysis.

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT yang telah memberikan rahmat, berkah, dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul “Analisis Keandalan Sistem Pabrik Phonska IV PT Petrokimia Gresik dengan Pendekatan Distribusi *Phase-Type*”. Laporan Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana pada program studi S-1 di Departemen Teknik Sistem dan Industri ITS. Selama penulisan Tugas Akhir ini penulis menerima saran, dukungan, dan bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Kedua orang tua penulis, Bapak Bedjo Wardono dan Ibu Arika Aryandani serta keluarga yang senantiasa memberikan doa, dukungan, dan motivasi kepada penulis.
2. Stefanus Eko Wiratno, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan ilmu, arahan, dan motivasi serta kesabaran dalam membimbing penulis selama proses penyelesaian Tugas Akhir.
3. Bapak Saiful Anwar selaku pembimbing eksternal di PT Petrokimia Gresik yang telah meluangkan waktu untuk berdiskusi dan membantu penulis dalam proses pengambilan data.
4. Prof. Dr. Ir. Budisantoso Wirjodirjo, M.Eng. selaku dosen penguji seminar proposal dan dosen penguji sidang akhir dan Niken Anggraini Savitri, S.T., M.T. selaku dosen penguji sidang akhir yang telah memberikan kritik dan saran yang membangun untuk penyelesaian Tugas Akhir.
5. Nurhadi Siswanto, S.T., MSIE., Ph.D. selaku Kepala Departemen Teknik Sistem dan Industri sekaligus dosen penguji seminar proposal Tugas Akhir, Nani Kurniati, S.T., M.T., Ph.D. selaku Sekretaris Departemen Teknik Sistem dan Industri sekaligus dosen penguji seminar proposal Tugas Akhir, serta Ibu Lusiana Ariesanti yang telah membantu kelancaran proses birokrasi selama pengerjaan Tugas Akhir.
6. Seluruh Bapak dan Ibu Dosen Departemen Teknik Sistem dan Industri ITS yang telah mendidik dan memberikan berbagai ilmu selama masa perkuliahan.

7. Teman-teman Teknik Industri Angkatan 2016 yang telah memberikan banyak dukungan selama masa perkuliahan dan proses penyelesaian Tugas Akhir.
8. Semua pihak yang terlibat yang tidak dapat disebutkan satu persatu yang telah memberikan dukungan dan bantuan kepada penulis.

Penulis berharap laporan Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat bagi para pembaca. Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini belum sempurna. Oleh sebab itu penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun untuk perbaikan bagi penelitian ini. Penulis mengucapkan terima kasih.

Surabaya, Agustus 2020

Penulis

## DAFTAR ISI

<b>ABSTRAK .....</b>	<b>i</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>iii</b>
<b>KATA PENGANTAR.....</b>	<b>v</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>vii</b>
<b>DAFTAR TABEL .....</b>	<b>xi</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>xiii</b>
<b>BAB 1 PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Perumusan Masalah .....	6
1.3 Tujuan Penelitian .....	6
1.4 Manfaat Penelitian .....	6
1.5 Ruang Lingkup Penelitian.....	6
1.5.1 Batasan .....	6
1.5.2 Asumsi .....	7
1.6 Sistematika Penulisan .....	7
<b>BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....</b>	<b>11</b>
2.1 Pemodelan Sistem.....	11
2.1.1 Sistem.....	11
2.1.2 Metodologi <i>Hard OR</i> .....	12
2.1.3 Pengumpulan dan Analisis Data .....	13
2.2 Industri Proses.....	14
2.3 <i>Dependability</i> .....	16
2.4 Keandalan.....	17
2.4.1 Fungsi Keandalan.....	18
2.4.2 <i>Hazard Rate</i> .....	18
2.4.3 <i>Mean Time to Failure (MTTF)</i> .....	19
2.4.4 Distribusi Data Waktu Antar Kerusakan.....	20
2.4.5 <i>Repairable</i> dan <i>Nonrepairable Unit</i> .....	22
2.4.6 Keandalan Sistem.....	22
2.4.7 <i>Reliability Block Diagram</i> .....	24

2.5	Distribusi <i>Phase-Type</i> .....	25
2.5.1	Distribusi <i>Phase-Type</i> .....	25
2.5.2	Operasi <i>Kronecker</i> .....	31
2.5.3	Pendekatan Distribusi <i>Phase-Type</i> untuk Keandalan .....	32
<b>BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN .....</b>		<b>41</b>
3.1	Studi Sistem Proses Produksi Phonska IV .....	42
3.2	Pengumpulan Data .....	43
3.3	Pengolahan Data .....	44
3.4	Analisis Sistem Eksisting dan Usulan Perbaikan Sistem .....	45
3.5	Kesimpulan dan Saran .....	45
<b>BAB 4 PENGUMPULAN DAN PENGOLAHAN DATA .....</b>		<b>47</b>
4.1	Deskripsi Sistem Produksi Phonska IV .....	47
4.2	<i>Reliability Block Diagram</i> .....	50
4.3	Distribusi Waktu antar Kerusakan .....	52
4.4	Perhitungan Keandalan Sistem .....	57
4.5	Penentuan Subsystem Kritis .....	63
<b>BAB 5 ANALISIS SISTEM EKSISTING DAN USULAN PERBAIKAN SISTEM .....</b>		<b>67</b>
5.1	Analisis Keandalan Sistem Eksisting .....	67
5.2	Analisis Sensitivitas .....	69
5.2.1	Pengaruh Struktur Paralel .....	70
5.2.2	Pengaruh Struktur <i>Standby Perfect Switch</i> .....	71
5.2.3	Pengaruh Penggantian Peralatan .....	71
5.3	Rancangan dan Analisis Skenario Perbaikan .....	72
5.3.1	Skenario Perbaikan 1 .....	72
5.3.2	Skenario Perbaikan 2 .....	74
5.3.3	Skenario Perbaikan 3 .....	76
5.3.4	Skenario Perbaikan 4 .....	78
5.3.5	Skenario Perbaikan 5 .....	79
5.3.6	Analisis Skenario Perbaikan .....	81
<b>BAB 6 KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>		<b>89</b>
6.1	Kesimpulan .....	89



6.2	Saran.....	90
<b>DAFTAR PUSTAKA</b>	.....	<b>91</b>
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b>	.....	<b>95</b>
	Lampiran 1. Rekap Hasil <i>Fitting</i> Data Kerusakan Peralatan ke Distribusi <i>Phase-Type</i> .....	95
<b>BIOGRAFI PENULIS</b>	.....	<b>105</b>

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Contoh Distribusi <i>Phase-Type</i> dalam Analisis Keandalan .....	34
Tabel 3.1 Data yang Dibutuhkan dalam Penelitian.....	44
Tabel 4.1 Daftar Peralatan Mekanik Pabrik Phonska IV.....	49
Tabel 4.2 Rekap Distribusi dan Parameter dari Peralatan Pabrik Phonska IV .....	53
Tabel 4.3 Nilai CVTTF dan MTTF Distribusi <i>Weibull</i> dan Distribusi <i>Phase-Type</i> Peralatan B22M362.....	57
Tabel 4.4 Hasil Perhitungan Nilai Keandalan Sistem Metode Skalar .....	57
Tabel 4.5 Hasil Perhitungan <i>Closure Properties</i> Sistem Seri .....	60
Tabel 4.6 Hasil Perhitungan Nilai Keandalan Sistem Metode Pendekatan Distribusi <i>Phase-Type</i> .....	61
Tabel 4.7 Rekap Hasil Perhitungan Nilai Keandalan Sistem dan <i>Hazard</i> Sistem	62
Tabel 4.8 MTTF dan CVTTF Sistem Eksisting.....	62
Tabel 4.9 Hasil Perhitungan <i>Birnbaum's Importance Index</i> Subsistem .....	65
Tabel 4.10 Hasil Perhitungan <i>Birnbaum's Importance Index</i> Peralatan.....	65
Tabel 5.1 Hasil Perhitungan <i>Stream Days</i> Sistem Eksisting.....	69
Tabel 5.2 Nilai Keandalan Sistem Eksisting dan <i>Hazard</i> Sistem $t = 0$ Hingga $t = 720$ .....	70
Tabel 5.3 Hasil Analisis Sensitivitas Pengaruh Struktur Paralel .....	71
Tabel 5.4 Hasil Analisis Sensitivitas Pengaruh Struktur <i>Standby Perfect Switch</i> ..	71
Tabel 5.5 Hasil Analisis Sensitivitas Pengaruh Penggantian Peralatan.....	71
Tabel 5.6 Hasil Perhitungan Keandalan Sistem Perbaikan Skenario 1.....	73
Tabel 5.7 Rekap Hasil Perhitungan Nilai Keandalan Sistem dan <i>Hazard</i> Sistem pada Skenario 1 .....	73
Tabel 5.8 Hasil Perhitungan Keandalan Sistem Perbaikan Skenario 2.....	75
Tabel 5.9 Rekap Hasil Perhitungan Nilai Keandalan Sistem dan <i>Hazard</i> Sistem pada Skenario 2 .....	75
Tabel 5.10 Hasil Perhitungan Keandalan Sistem Perbaikan Skenario 3.....	77
Tabel 5.11 Rekap Hasil Perhitungan Nilai Keandalan Sistem dan <i>Hazard</i> Sistem pada Skenario 3 .....	77
Tabel 5.12 Hasil Perhitungan Keandalan Sistem Perbaikan Skenario 4.....	78

Tabel 5.13 Rekap Hasil Perhitungan Nilai Keandalan Sistem dan <i>Hazard</i> Sistem pada Skenario 4 .....	78
Tabel 5.14 Hasil Perhitungan Keandalan Sistem Perbaikan Skenario 5 .....	79
Tabel 5.15 Rekap Hasil Perhitungan Nilai Keandalan Sistem dan <i>Hazard</i> Sistem pada Skenario 5 .....	80
Tabel 5.16 Rekap Nilai Keandalan Sistem Perbaikan .....	81
Tabel 5.17 Hasil Perhitungan <i>Stream Days</i> Sistem Perbaikan .....	83
Tabel 5.18 Rekap Hasil Perhitungan Nilai Keandalan Sistem Perbaikan $t = 0$ hingga $t = 8760$ .....	84
Tabel 5.19 Rekap Hasil Perhitungan Nilai <i>Hazard</i> Sistem Perbaikan $t = 0$ hingga $t = 8760$ .....	85

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Durasi <i>Unscheduled Downtime</i> Peralatan Pabrik Phonska IV Tahun 2019.....	2
Gambar 1.2 Grafik <i>Stream Days</i> Pabrik Phonska IV Tahun 2017-2019 .....	5
Gambar 2.1 Cara Mempelajari Sistem.....	11
Gambar 2.2 Pohon <i>Dependability</i> IFIP WG 10.4.....	16
Gambar 2.3 Kurva <i>Bathtub-Shaped</i> .....	18
Gambar 2.4 <i>Reliability Block Diagram</i> Umum.....	25
Gambar 2.5 Distribusi Eksponensial.....	27
Gambar 2.6 Distribusi <i>Erlang</i> .....	28
Gambar 2.7 Distribusi <i>Hypo-Exponential</i> .....	28
Gambar 2.8 Distribusi <i>Hyper-Exponential</i> .....	29
Gambar 2.9 Distribusi <i>Hyper-Erlang</i> .....	31
Gambar 2.10 Distribusi <i>Coxian</i> .....	31
Gambar 3.1 <i>Flowchart</i> Metodologi Penelitian.....	41
Gambar 4.1 Diagram Alir Proses Pembuatan Pupuk Phonska.....	48
Gambar 4.2 <i>Reliability Block Diagram</i> Pabrik Phonska IV.....	51
Gambar 4.3 Grafik CDF Hasil <i>Fitting</i> Distribusi <i>Weibull</i> Peralatan B22M362 ke Distribusi <i>Phase-Type</i> .....	56
Gambar 4.6 Hierarki Keandalan Sistem.....	64
Gambar 5.1 Grafik Keandalan Sistem Eksisting.....	68
Gambar 5.2 Grafik <i>Hazard</i> Sistem Eksisting.....	68
Gambar 5.3 <i>Reliability Block Diagram</i> Subsistem <i>Coal Burner</i> Perbaikan Struktur Paralel.....	72
Gambar 5.4 Struktur <i>Standby Perfect Switch</i> Peralatan <i>Coal Crusher</i> .....	75
Gambar 5.5 Grafik Keandalan Sistem Eksisting dan Sistem Perbaikan $t = 0$ hingga $t = 720$ .....	82
Gambar 5.6 Grafik <i>Hazard</i> Sistem Eksisting dan Sistem Perbaikan $t = 0$ hingga $t = 720$ .....	82
Gambar 5.7 Grafik Keandalan Sistem Eksisting dan Sistem Perbaikan $t = 0$ hingga $t = 8760$ .....	86

Gambar 5.8 Grafik *Hazard* Sistem Eksisting dan Sistem Perbaikan  $t = 0$  hingga  $t = 8760$ .....86

# BAB 1

## PENDAHULUAN

Pada bab ini dijelaskan mengenai latar belakang penelitian, perumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, ruang lingkup penelitian, dan sistematika penulisan dari penelitian Tugas Akhir ini.

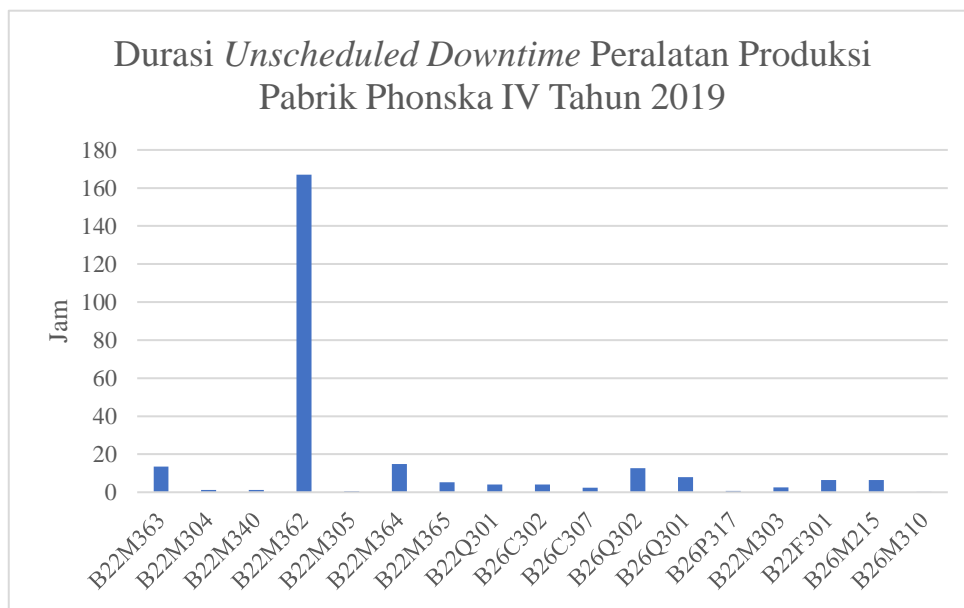
### 1.1 Latar Belakang

PT Petrokimia Gresik merupakan perusahaan yang bergerak di bidang agroindustri dengan menghasilkan produk pupuk dan non pupuk. PT Petrokimia Gresik mengoperasikan 31 pabrik yang terdiri dari 17 pabrik yang memproduksi produk pupuk dan 14 pabrik yang memproduksi produk non pupuk. Produk pupuk terdiri dari pupuk urea, pupuk ZA, pupuk SP-36, pupuk NPK, pupuk phonska, dan pupuk ZK. Sementara itu produk non pupuk terdiri dari amoniak, asam sulfat, asam fosfat, *gypsum*, aluminium florida, CO<sub>2</sub> cair, *dry ice*, dan asam klorida.

Salah satu produk utama dari PT Petrokimia Gresik adalah pupuk phonska. Pupuk Phonska merupakan produk pupuk subsidi dengan wilayah pemasaran untuk seluruh kabupaten dan kota di Indonesia. Pupuk Phonska merupakan jenis produk pupuk *non urea* dengan jumlah produksi terbesar. Pupuk Phonska memiliki empat fasilitas produksi yang berada di wilayah Pabrik II PT Petrokimia Gresik yaitu Phonska I, Phonska II, Phonska III, dan Phonska IV.

Pabrik Phonska IV merupakan salah satu fasilitas produksi pupuk phonska yang mulai beroperasi pada tahun 2011. Suatu fasilitas produksi terdiri dari mesin dan peralatan yang menunjang proses produksi. Peralatan pada fasilitas produksi Phonska IV diklasifikasikan menjadi peralatan mekanik, peralatan listrik, dan peralatan instrumentasi. Pabrik Phonska IV memiliki kapasitas produksi 600.000 ton per tahun. Proses produksi pupuk phonska dilakukan secara *continuous production*. Peralatan produksi digunakan hanya untuk satu jenis produk dan proses produksi dilakukan secara berkelanjutan pada aliran material dan tidak terdapat gangguan pada aliran *output*. Proses produksi dilakukan selama 24 jam dalam sehari dan 7 hari dalam seminggu. Proses produksi pupuk phonska terdiri dari proses penetralan bahan baku, granulasi, pengeringan, pendinginan, dan pelapisan.

Serangkaian proses produksi tersebut dapat memenuhi target produksi yang diinginkan apabila mesin dan peralatan produksi beroperasi pada tingkat keandalan tertentu. Keandalan merupakan probabilitas suatu produk atau layanan akan beroperasi dengan benar tanpa kegagalan untuk periode waktu tertentu (umur desain) di bawah kondisi operasi desain seperti suhu, beban, dan tegangan (Elsayed, 2012). Gambar 1.1 merupakan grafik durasi *unscheduled downtime* peralatan produksi Pabrik Phonska IV tahun 2019.



Gambar 1.1 Durasi *Unscheduled Downtime* Peralatan Pabrik Phonska IV Tahun 2019

Terdapat berbagai pengukuran yang dapat digunakan dalam analisis keandalan yaitu fungsi keandalan, fungsi *hazard*, dan *mean time to failure*. Pengukuran dalam analisis keandalan dapat dilakukan baik untuk peralatan maupun sistem. Pabrik Phonska IV saat ini belum melakukan analisis keandalan baik untuk mesin dan peralatan produksi maupun untuk sistem keseluruhan. Oleh sebab itu diperlukan analisis keandalan sistem untuk mengetahui keandalan sistem dan dampaknya terhadap kinerja sistem.

Analisis keandalan sistem pada pabrik Phonska IV diawali dengan membuat *reliability block diagram*. Metode *reliability block diagram* (RBD) mempertimbangkan keandalan setiap blok untuk mengevaluasi keandalan atau ketersediaan keseluruhan sistem (Trivedi & Bobbio, 2017). *Reliability block*



*diagram* juga menggambarkan struktur dari sistem yang akan dianalisis. Struktur sistem diantaranya yaitu sistem seri, sistem paralel, sistem *k-out-of-n*, dan sistem *standby*. Perhitungan keandalan sistem dilakukan sesuai dengan struktur sistem. Pabrik Phonska IV memiliki subsistem dengan struktur seri dan peralatan dengan struktur seri, paralel, dan *k-out-of-n*.

Perhitungan keandalan sistem dapat dilakukan melalui metode matematis maupun simulasi. Agrawal *et al.*, (2019) melakukan perhitungan keandalan sistem dengan menggunakan matriks *Markov chain* pada *tunnel boring machine*. Perhitungan keandalan sistem dengan metode *Markov chain* tersebut dilakukan dengan asumsi bahwa *failure rate* dan *repair rate* konstan dan berdistribusi eksponensial. Haynes *et al.*, (2018) menggunakan *discrete-event simulation* untuk melakukan peramalan keandalan mesin pesawat. Hasil dari simulasi yang dilakukan memberikan nilai *mean time to repair*, jumlah penghilangan modul dan komponen, serta *availability* mesin. Koc *et al.*, (2019) melakukan perhitungan keandalan sistem pada *cyber physical system* dengan metode skalar menggunakan *reliability value*. *Reliability value* bersifat statis dan tidak berubah terhadap waktu. Perhitungan keandalan sistem dengan menggunakan *reliability value* tidak dapat mengakomodasi keandalan sebagai fungsi waktu. Penelitian yang dilakukan oleh Ardakan *et al.*, (2017) menunjukkan bahwa komponen memiliki kurva keandalan yang berbeda selama masa pakai sistem sehingga perlu untuk mempertimbangkan keandalan sebagai fungsi waktu.

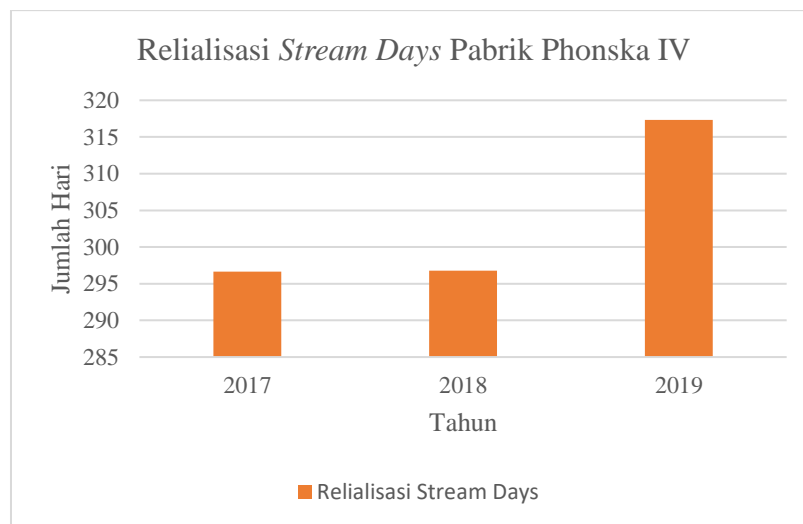
Soleimani *et al.*, (2014) melakukan perhitungan keandalan sistem dengan metode skalar menggunakan fungsi keandalan. Sistem pada penelitian tersebut terdiri dari beberapa komponen yang memiliki distribusi waktu antar kerusakan yang identik sehingga perhitungan keandalan sistem dapat dilakukan secara konvensional. Alkaff & Qomarudin (2020) menjelaskan bahwa perhitungan keandalan sistem dengan menggunakan fungsi keandalan secara konvensional sulit dilakukan pada sistem yang terdiri dari beberapa komponen dengan distribusi data waktu antar kerusakan yang berbeda. Alkaff & Qomarudin (2020) mengusulkan penggunaan distribusi *phase-type* berbasis matriks untuk melakukan analisis keandalan sistem dalam bentuk fungsi keandalan pada sistem dengan komponen *mixture*.

Distribusi *phase-type* dapat mendekati berbagai distribusi acak sehingga dapat meningkatkan fleksibilitas dan kegunaan analisis keandalan sistem (Kim & Kim, 2016). Penelitian yang dilakukan oleh Riascos-Ochoa *et al.*, (2014) menunjukkan bahwa model distribusi *phase-type* dapat mengurangi asumsi bahwa waktu kerusakan komponen memiliki distribusi yang identik. Kemampuan distribusi *phase-type* dalam mendekati berbagai distribusi acak membuat fungsi keandalan komponen dapat direpresentasikan dalam bentuk distribusi *phase-type*. Distribusi *phase-type* memiliki *closure properties* sehingga operasi pada distribusi *phase-type* akan mengarah lagi ke distribusi *phase-type*. Analisis keandalan sistem menggunakan fungsi keandalan sistem yang didapatkan dari fungsi keandalan komponen dapat dilakukan dengan menggunakan *closure properties*.

Distribusi *phase-type* banyak digunakan untuk memodelkan sistem stokastik. Sistem yang dimodelkan merupakan sistem *nonrepairable* sehingga *transient state* pada distribusi *phase-type* merepresentasikan *good condition* sedangkan *absorbing state* merepresentasikan *failed condition*. Alkaff & Qomarudin (2020) menjelaskan keuntungan analisis keandalan sistem dengan menggunakan distribusi *phase-type* diantaranya yaitu, (1) distribusi *phase-type* dapat digunakan sebagai model pengganti untuk *constant failure rate* (CFR), *increasing failure rate* (IFR), dan *decreasing failure rate* (DFR), bahkan distribusi dengan *failure rate* yang meningkat dan menurun dalam bentuk *bathtub curves* (BFR) seperti pada distribusi *Weibull*, (2) distribusi *phase-type* memiliki *closure properties* yang berguna dalam mengekspresikan fungsi keandalan sistem dalam hal fungsi keandalan komponen, (3) distribusi *phase-type* dapat mengurangi kebutuhan integrasi numerik ke aljabar numerik dan dapat menghasilkan *simple closed form solution* untuk mendapatkan parameter pada berbagai sistem stokastik dan perhitungan MTTF menjadi lebih sederhana, dan (4) distribusi *phase-type* dapat diaplikasikan pada *multistate system* dengan *multistate* komponen karena *order* dari distribusi *phase-type* dapat merepresentasikan banyak tingkatan kondisi baik sebelum terjadi kegagalan.

Kinerja sistem pada industri proses dapat diukur melalui *stream days*. *Stream days* merupakan hari operasi pada industri proses dengan mempertimbangkan *throughput* maksimum yang dapat dicapai pabrik dalam sehari.

*Stream days* dapat mendefinisikan kapasitas unit proses tanpa adanya perlambatan atau pemadaman untuk pemeliharaan atau pertimbangan operasional. *Stream days* mempengaruhi kapasitas produksi suatu pabrik. Kapasitas produksi ditentukan oleh jumlah waktu pabrik beroperasi dan laju produksi. Masalah keandalan peralatan dapat menyebabkan hilangnya waktu operasi sehingga mempengaruhi laju produksi (Groover, 2015). Oleh sebab itu diperlukan sistem dengan tingkat keandalan tertentu sehingga target *stream days* dapat tercapai untuk memenuhi target produksi. Gambar 1.2 merupakan grafik *stream days* pabrik Phonska IV tahun 2017 – 2019. Berdasarkan Gambar 1.2 *stream days* pabrik Phonska IV pada tahun 2017, 2018, dan 2019 yaitu 296,65 hari, 296,78 hari, dan 317,31 hari.



Gambar 1.2 Grafik *Stream Days* Pabrik Phonska IV Tahun 2017-2019  
(PT Petrokimia Gresik, 2020)

Besarnya *stream days* didapatkan dari jumlah hari yang tersedia dalam setahun dikurangi dengan jumlah hari *downtime* dalam setahun. Pabrik Phonska IV memiliki target *stream days* sebesar 320 hari dalam setahun. Peningkatan *stream days* dapat dilakukan dengan mengurangi *downtime* melalui peningkatan keandalan sistem. Soleimani *et al.*, (2014) memberikan beberapa alternatif yang dapat dilakukan untuk meningkatkan keandalan sistem yaitu, (1) mengurangi kompleksitas sistem, (2) menggunakan komponen dengan keandalan tinggi, (3) menggunakan struktur *redundant*, (4) menerapkan pemeliharaan terencana, jadwal

perbaikan, dan kebijakan penggantian, dan (5) menurunkan *downtime* dengan mengurangi keterlambatan perbaikan. Peningkatan keandalan sistem Pabrik Phonska IV dilakukan dengan meningkatkan keandalan peralatan pada subsistem kritis yang ditentukan melalui *reliability importance measure*.

## **1.2 Perumusan Masalah**

Permasalahan yang dibahas pada penelitian ini adalah bagaimana melakukan perhitungan dan analisis keandalan sistem dalam bentuk fungsi keandalan pada Pabrik Phonska IV dengan menggunakan pendekatan distribusi *phase-type*.

## **1.3 Tujuan Penelitian**

Tujuan yang ingin dicapai dari penelitian ini yaitu,

1. Menghitung keandalan sistem Pabrik Phonska IV menggunakan metode skalar konvensional dengan *reliability block diagram*.
2. Menghitung keandalan sistem Pabrik Phonska IV dengan model keandalan sistem yang menggunakan distribusi *phase-type*.
3. Melakukan analisis sensitivitas pengaruh perubahan variabel terhadap keandalan sistem Pabrik Phonska IV.

## **1.4 Manfaat Penelitian**

Manfaat yang didapatkan dari penelitian ini yaitu,

1. Perusahaan mendapat informasi mengenai nilai keandalan sistem Pabrik Phonska IV.
2. Perusahaan mendapat rekomendasi perbaikan untuk peningkatan nilai keandalan sistem.

## **1.5 Ruang Lingkup Penelitian**

Ruang lingkup pada penelitian ini terdiri dari batasan dan asumsi sebagai berikut,

### **1.5.1 Batasan**

Batasan yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Analisis keandalan sistem hanya dilakukan pada peralatan mekanik untuk proses produksi. Peralatan yang memiliki *lifetime* yang sangat panjang seperti *non rotating equipment* tidak dipertimbangkan dalam perhitungan keandalan sistem.
2. Pemodelan keandalan dilakukan pada tingkat sistem (*level 0*), tingkat subsistem (*level 1*), dan tingkat mesin dan peralatan (*level 2*).
3. Data yang digunakan dalam perhitungan keandalan adalah data pada tahun 2017 – 2019 sesuai yang diberikan oleh PT Petrokimia Gresik. Data yang tidak memenuhi persyaratan akan dicari melalui *manual book*, OREDA, *benchmark*, atau wawancara.
4. Penelitian ini tidak mempertimbangkan biaya untuk dapat meningkatkan keandalan sistem.
5. Analisis sensitivitas dilakukan untuk kebutuhan akademik, bukan pada rencana implementasi pada sistem nyata.

#### 1.5.2 Asumsi

Asumsi yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Kerusakan peralatan yang terjadi bukan disebabkan oleh *human error*.
2. Mesin beroperasi pada kondisi normal.

### 1.6 Sistematika Penulisan

Penulisan penelitian ini terdiri dari Pendahuluan, Tinjauan Pustaka, Metodologi Penelitian, Pengumpulan dan Pengolahan Data, Analisis Sistem Eksisting dan Usulan Perbaikan Sistem, serta Kesimpulan dan Saran. Berikut merupakan uraian setiap bab pada penelitian ini.

## BAB 1 PENDAHULUAN

Bab ini membahas mengenai latar belakang penelitian, perumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, ruang lingkup penelitian, dan sistematika penulisan dari penelitian Tugas Akhir ini.

## BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini membahas mengenai tinjauan pustaka yang digunakan sebagai dasar teori dalam penelitian ini. Dasar teori yang digunakan antara lain pemodelan sistem, industri proses, *dependability*, keandalan, dan distribusi *phase-type*

## BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini membahas mengenai tahapan yang dilakukan dalam penelitian ini. Tahapan tersebut meliputi tahap studi sistem, tahap pengumpulan dan pengolahan data, tahap analisis, serta tahap kesimpulan dan saran.

## BAB 4 PENGUMPULAN DAN PENGOLAHAN DATA

Bab ini membahas mengenai deskripsi sistem produksi Phonska IV, pembuatan *reliability block diagram*, perhitungan keandalan sistem secara skalar, dan perhitungan keandalan sistem menggunakan pendekatan distribusi *phase-type* pada kondisi eksisting. Pada bab ini juga dilakukan penentuan subsistem kritis untuk peningkatan keandalan.

## BAB 5 ANALISIS KEANDALAN SISTEM EKSISTING DAN USULAN PERBAIKAN SISTEM

Bab ini membahas mengenai analisis keandalan sistem pada kondisi eksisting. Analisis dilakukan pada sistem eksisting meliputi fungsi keandalan, fungsi *hazard*, dan *mean time to failure*. Analisis sensitivitas dilakukan sebagai dasar dari usulan perbaikan sistem. Faktor yang dianalisis dalam analisis sensitivitas diantaranya yaitu penambahan komponen *redundant* dengan struktur paralel dan *standby perfect switch* serta penggantian peralatan. Analisis sensitivitas dilakukan untuk mengetahui perubahan keandalan sistem terhadap faktor yang mempengaruhi.

## BAB 6 KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini membahas mengenai kesimpulan dari penelitian yang telah dilakukan berdasarkan tujuan penelitian. Bab ini juga membahas mengenai saran

yang diberikan berdasarkan hasil penelitian ini sebagai rekomendasi untuk penelitian selanjutnya.

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*



## BAB 2

### TINJAUAN PUSTAKA

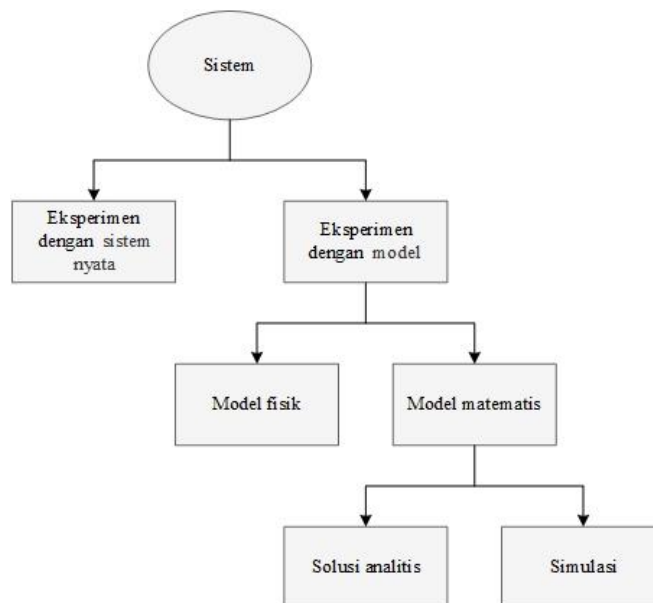
Pada bab ini dijelaskan mengenai tinjauan pustaka yang digunakan dalam melakukan penelitian. Tinjauan pustaka yang digunakan sebagai dasar teori pada penelitian ini yaitu pemodelan sistem, industri proses, *dependability*, keandalan, dan distribusi *phase-type*.

#### 2.1 Pemodelan Sistem

Pada subbab ini akan dijelaskan mengenai sistem, metodologi *Hard OR*, dan pengumpulan dan analisis data.

##### 2.1.1 Sistem

Sistem merupakan sekumpulan hal baik fisik maupun abstrak, entitas, atau orang-orang yang berhubungan satu sama lain dengan cara tertentu, yaitu yang diatur dan mengikuti aturan interaksi tertentu (Daellenbach, *et al.*, 2012). Suatu sistem terdiri dari komponen, hubungan antara komponen, perilaku atau aktivitas sistem, lingkungan yang relevan, *input* dari lingkungan, *output* ke lingkungan, dan minat khusus dari pengamat (Daellenbach, *et al.*, 2012). Gambar 2.1 menjelaskan bagaimana cara mempelajari suatu sistem yang dapat dilakukan melalui eksperimen langsung dan pemodelan.



Gambar 2.1 Cara Mempelajari Sistem (Law, 2014)

Berdasarkan Gambar 2.1 mempelajari sistem dapat dilakukan baik dengan eksperimen langsung kepada sistem yang sebenarnya maupun melalui pemodelan sistem. Pemodelan sistem dapat dilakukan dengan menggunakan model fisik dan model matematis. Model yang merepresentasikan semua bagian penting dari sistem merupakan model sistem (Daellenbach, *et al.*, 2012). Model yang mengungkapkan hubungan antar berbagai komponen secara kuantitatif sebagaimana mereka didefinisikan dalam sistem yang relevan yang dikembangkan dalam fase formulasi merupakan model matematika (Daellenbach, *et al.*, 2012). Model matematika terdiri dari *decision variables*, *objective function*, *uncontrollable inputs*, dan *constraints*. Jika solusi analitis dari model matematika tersedia, maka simulasi tidak perlu dilakukan. Namun pada kasus ketika sistem memiliki kompleksitas yang tinggi maka simulasi perlu dilakukan. Simulasi mengacu pada kumpulan metode dan aplikasi yang luas untuk meniru perilaku sistem nyata (Kelton, *et al.*, 2014). Pada model simulasi, sebuah sistem tersusun dari elemen sistem yaitu entitas, aktivitas, *resources*, dan kontrol serta variabel sistem yang terdiri dari variabel keputusan, variabel respon, dan variabel status.

### 2.1.2 Metodologi Hard OR

Salah satu metode yang dapat digunakan untuk menyelesaikan permasalahan dalam sistem adalah metodologi *hard OR*. Metodologi *hard OR* mencakup tiga fase yang terdefinisi dengan baik yaitu formulasi masalah, pemodelan matematika, dan implementasi solusi, yang merupakan proses berulang dan masing-masing terdiri dari beberapa langkah, dengan hubungan ke depan dan ke belakang (Daellenbach, *et al.*, 2012).

Terdapat sebelas langkah dalam metodologi *hard OR* yang terbagi ke dalam tiga fase. Fase formulasi masalah bertujuan untuk mengidentifikasi permasalahan yang akan dianalisis dan mendefinisikan sistem relevannya. Fase formulasi masalah terdiri dari tiga langkah. Langkah pertama yaitu membuat ringkasan mengenai situasi permasalahan yang akan membantu untuk fokus kepada masalah yang akan dianalisis. Langkah kedua yaitu mengidentifikasi masalah yang tepat untuk dianalisis. Identifikasi masalah dapat dilakukan dengan mendefinisikan elemen permasalahan. Elemen permasalahan terdiri dari *decision maker*, *decision's maker objective*, *decision criterion*, *performance measure*, *control inputs* atau

*alternative course of action*, dan konteks di mana permasalahan terjadi. Langkah ketiga yaitu mendefinisikan sistem yang relevan yang meliputi pendefinisian mengenai *input* dan *output* sistem, batasan sistem, dan variabel sistem. Fase kedua yaitu pemodelan masalah yang terdiri dari langkah keempat hingga ketujuh. Langkah keempat yaitu pembuatan model matematika sesuai dengan masalah yang telah didefinisikan. Pada langkah kelima dilakukan manipulasi model untuk mengeksplorasi respon sistem terhadap perubahan *input* sehingga didapatkan solusi yang diinginkan. Langkah keenam yaitu uji coba model dan validasi untuk mengetahui apakah model benar secara logis dan matematis serta dapat merepresentasikan masalah yang sebenarnya. Langkah ketujuh yaitu analisa sensitivitas. Fase terakhir yaitu implementasi solusi yang terdiri dari empat langkah. Langkah kedelapan hingga kesebelas masing-masing yaitu perencanaan implementasi, menetapkan prosedur untuk pemeliharaan dan pengendalian solusi, implementasi aktual, dan analisis dan audit.

### 2.1.3 *Pengumpulan dan Analisis Data*

Pengumpulan data merupakan salah satu bagian penting dalam pemodelan. Terdapat enam langkah yang digunakan dalam pengumpulan data yaitu menentukan kebutuhan data, mengidentifikasi sumber data, mengumpulkan data, membuat asumsi jika dibutuhkan, menganalisis data, dan mendokumentasikan dan menyetujui data (Harrell, *et al.*, 2000).

Data yang dibutuhkan dapat dikategorikan menjadi data struktural, data operasional, dan data numerik. Data struktural memberikan informasi mengenai *layout* atau konfigurasi dari sistem yang dimodelkan, data operasional menjelaskan bagaimana sistem beroperasi, dan data numerik memberikan informasi kuantitatif dalam sistem. Terdapat berbagai sumber data yang dapat digunakan yaitu catatan historis, observasi personal, wawancara personal, *benchmark* dengan sistem sejenis, klaim *vendor*, perkiraan desain, dan literatur penelitian. Analisis data mencakup analisis deskriptif, pengujian independen data, pengujian data berdistribusi identik, *fitting* distribusi data, dan pemilihan distribusi data ketika data tidak tersedia.

Data yang tidak tersedia dapat diperoleh melalui orang-orang yang memiliki keahlian dalam beberapa aspek dari sistem yang dimodelkan. Selain

melalui pendapat ahli, suatu data juga dapat diperoleh dari sifat suatu proses data yang dibutuhkan yang dapat menunjukkan hasil yang diharapkan. Contohnya yaitu waktu antar kedatangan yang biasa digambarkan dalam distribusi eksponensial. Pada data numerik, perkiraan data dapat didapatkan melalui nilai *single* berupa nilai yang paling mungkin atau rata-rata, nilai minimum dan maksimum berupa *range*, serta nilai minimum, nilai yang paling mungkin, dan nilai maksimum. Nilai minimum, nilai yang paling mungkin, dan nilai maksimum merupakan estimasi terbaik untuk mendapatkan variabel acak ketika data historis tidak dapat diperoleh. Nilai minimum, nilai yang paling mungkin, dan nilai maksimum menyerupai distribusi *triangular* atau distribusi *beta*. Sumber keacakan dapat dimodelkan dengan distribusi *triangular* dan distribusi *beta* bahkan ketika pengumpulan dan analisis data yang diperlukan layak untuk dilakukan (Law, 2014). Estimasi menggunakan nilai minimum, nilai yang paling mungkin, dan nilai maksimum menjadi yang paling realistis karena sebagian waktu aktivitas tidak simetris pada rata-rata. Data relevan yang telah dikumpulkan, dianalisis, dan dapat digunakan didokumentasikan dalam bentuk tabel, diagram relasional, dan daftar asumsi yang digunakan.

## 2.2 Industri Proses

Industri terdiri dari perusahaan dan organisasi yang memproduksi dan atau memasok barang dan atau jasa (Groover, 2015). Industri dapat diklasifikasikan menjadi industri primer, industri sekunder, dan industri tersier. Pada industri sekunder, proses manufaktur merupakan aktivitas utama yang dilakukan pada industri tersebut dengan merubah *output* dari industri primer menjadi produk (Groover, 2015). Industri sekunder terdiri dari industri proses dan industri produk diskrit. Groover (2015) mengklasifikasikan industri yang termasuk industri proses diantaranya yaitu industri bahan kimia, farmasi, minyak bumi, logam dasar, makanan, minuman, dan pembangkit tenaga listrik. Sedangkan industri produk diskrit terdiri dari industri mobil, pesawat terbang, peralatan, komputer, mesin, dan komponen-komponen untuk merakit produk tersebut.

Proses produksi pada industri proses dan industri produk diskrit dapat dibagi menjadi *continuous production* dan *batch production*. Pada *continuous*

*production*, peralatan produksi digunakan untuk suatu produk secara eksklusif sehingga *output* produk tidak terganggu. *Continuous production* pada industri proses dilakukan secara berkelanjutan pada aliran material dan tidak terdapat gangguan pada aliran *output*. Material yang diproses dapat berbentuk cair, gas, maupun bubuk. Pada *batch production*, produksi dilakukan dalam jumlah yang terbatas atau *batch*. Produksi pada *batch production* tidak terjadi secara berkelanjutan karena adanya pergantian *batch*. Pada industri proses, material yang digunakan dalam *batch production* umumnya merupakan bahan awal dalam bentuk cair atau curah.

Peralatan atau *equipment* yang terdapat pada industri proses diklasifikasikan menjadi *rotating equipment* dan *fixed equipment* atau *non rotating equipment*. *Rotating equipment* merupakan komponen mekanik yang menggunakan energi kinetik untuk memindahkan cairan, gas, dan material lainnya dalam proses produksi. *Rotating equipment* mengalami penurunan kinerja dan kegagalan mekanis karena beroperasi dalam kondisi yang merugikan seperti beban tinggi dan suhu (Li, *et al.*, 2017). Peralatan yang termasuk dalam *rotating equipment* diantaranya yaitu mesin, kompresor, turbin, pompa, *generator*, *blower*, dan *gearbox*. *Fixed equipment* merupakan peralatan yang tidak bergerak dalam industri proses. Peralatan yang termasuk dalam *fixed equipment* diantaranya yaitu bejana tekan, *heat exchanger*, *valve*, tangki penyimpanan, perpipaan, *boiler*, *heater*, dan *furnace*.

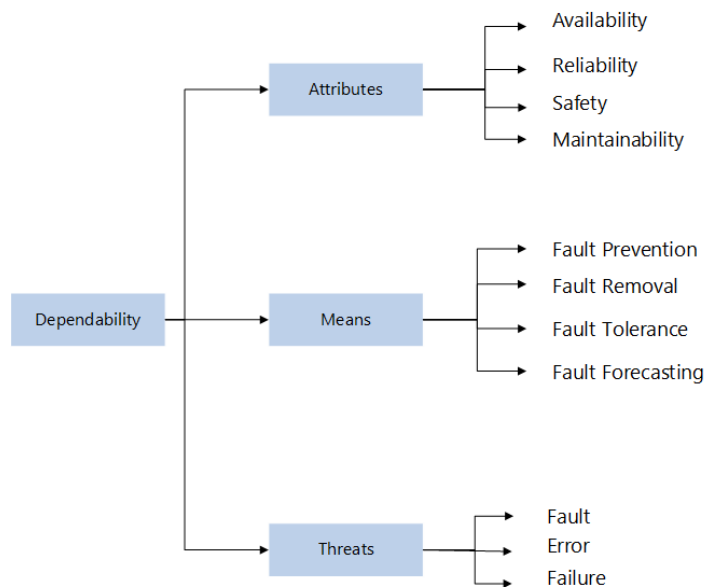
Suatu *plant* dirancang untuk menyelesaikan pekerjaan dengan ruang lingkup produk dan aktivitas tertentu. Keputusan untuk menentukan ruang lingkup dari sebuah *plant* disebut dengan *manufacturing capability*. *Manufacturing capability* mengacu pada kemampuan teknis dan fisik dari perusahaan manufaktur dan masing-masing pabriknya (Groover, 2015). *Manufacturing capability* dapat diidentifikasi melalui tiga dimensi yaitu, kemampuan pemrosesan teknologi, ukuran fisik dan berat produk, dan kapasitas produksi.

Kapasitas produksi merupakan tingkat *output* maksimum yang dapat diproduksi oleh fasilitas produksi dibawah serangkaian kondisi operasi yang diasumsikan (Groover, 2015). Pada industri proses, *plant* beroperasi selama 7 hari dalam seminggu dan 24 jam dalam sehari. Jumlah waktu *plant* beroperasi dan laju

produksi akan menentukan kapasitas produksi dari *plant* tersebut. Hari operasi pada industri proses didefinisikan sebagai *stream days*. *Stream days* merupakan hari operasi pada industri proses dengan mempertimbangkan *throughput* maksimum yang dapat dicapai pabrik dalam sehari. Kehilangan waktu operasi yang disebabkan oleh masalah keandalan peralatan dapat mempengaruhi laju produksi yang akan berakibat pada kapasitas produksi.

### 2.3 Dependability

Konsep yang mencakup atribut seperti *reliability*, *availability*, *safety*, *integrity*, dan *maintainability* adalah *dependability* (Trivedi & Bobbio, 2017). *International Electrotechnical Commission (IEC) vocabulary* mendefinisikan *dependability* suatu *item* sebagai kemampuan untuk memenuhi kriteria sukses di bawah kondisi pemakaian dan pemeliharaan tertentu. *Dependability* merupakan properti kualitatif dalam hal kecakapan sistem untuk memenuhi spesifikasi desain dan harapan pengguna. Penilaian *dependability* secara kuantitatif diperlukan untuk mengetahui sejauh mana sistem mampu memberikan operasi atau layanan yang diharapkan sesuai dengan rancangannya. Gambar 2.2 merupakan aspek penyusun *dependability* yang dikenal dengan pohon *dependability*.



Gambar 2.2 Pohon *Dependability* IFIP WG 10.4 (Trivedi & Bobbio, 2017)

Berdasarkan Gambar 2.2 *dependability* terdiri dari tiga aspek yaitu *threats*, *means*, dan *attributes*. *Threats* atau ancaman dari *dependability* terdiri dari *faults*, *errors*, dan *failures*. *Faults* merupakan penyebab dari *errors* dan *failures*. Ketika *fault* terjadi maka akan menghasilkan *internal errors*. Sebuah *error* atau akumulasi *error* dapat menimbulkan *failure*. *Failure* pada tingkat subsistem dapat menjadi *fault* pada tingkat sistem. *Means* merupakan cara untuk mencapai dan memastikan *dependability*. *Means* terdiri dari *fault prevention (fault avoidance)*, *fault removal*, *fault tolerance*, dan *fault forecasting*.

Evaluasi *dependability* secara kuantitatif dapat dilakukan melalui evaluasi atribut *dependability*. Evaluasi dan analisis *dependability* ditujukan untuk menyelidiki kemungkinan terjadinya *failures*, kapan dan bagaimana hal tersebut terjadi, dampaknya terhadap sistem secara keseluruhan atau pada bagian-bagiannya, dan cara untuk mencegah dan mitigasi *failures* (Trivedi & Bobbio, 2017). Informasi mengenai *failures* dan cara mitigasinya dapat diperoleh melalui dua sumber yaitu pengukuran (*measurements*) dan model. *Measurement-based evaluation* melibatkan pengumpulan informasi mengenai kejadian kegagalan beserta penyebab dan dampaknya terhadap sistem. *Measurement-based evaluation* terdiri dari *field measurements* yaitu melakukan pengukuran langsung terhadap komponen atau sistem dengan kondisi operasi normal dan *test measurements* yaitu dengan melakukan *life test* untuk memperkirakan umur hidup suatu *item*. Dalam banyak kasus, seringkali sistem tidak memungkinkan untuk dilakukan pengukuran sehingga dalam hal ini evaluasi *dependability* dilakukan dengan menggunakan model.

## 2.4 Keandalan

*Reliability* atau keandalan merupakan salah satu atribut yang digunakan untuk mengevaluasi *dependability* sistem. Secara kuantitatif, keandalan didefinisikan sebagai probabilitas. Keandalan merupakan probabilitas suatu produk atau layanan akan beroperasi dengan benar tanpa kegagalan untuk periode waktu tertentu (umur desain) di bawah kondisi operasi desain seperti suhu, beban, dan tegangan (Elsayed, 2012). Trivedi dan Bobbio (2017) mendefinisikan keandalan sebagai kemampuan suatu *item* untuk melakukan fungsi yang ditentukan pada suatu

interval waktu. Dalam hal ini keandalan merujuk pada operasi bebas kegagalan selama interval waktu tertentu. Keandalan dapat digambarkan secara kuantitatif melalui fungsi keandalan, laju kegagalan, dan *mean time to failure*.

#### 2.4.1 Fungsi Keandalan

Keandalan merupakan probabilitas suatu *item* dapat menjalankan fungsinya selama periode waktu  $t$  atau lebih. Jika  $T$  merupakan variabel acak yang dinotasikan sebagai *time to failure*, maka fungsi keandalan pada waktu  $t$  yaitu,

$$R(t) = P(T > t), \tag{1}$$

$$R(t) = 1 - P(T \leq t), \tag{2}$$

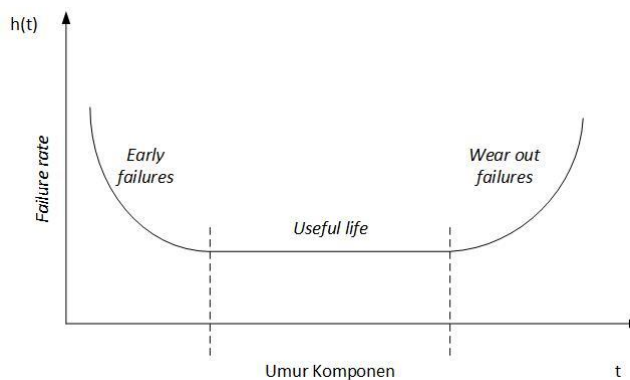
$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t f(t) dt. \tag{3}$$

#### 2.4.2 Hazard Rate

*Hazard function* atau *hazard rate* yang dinotasikan dengan  $h(t)$  merupakan probabilitas kondisional suatu *item* mengalami kegagalan pada *interval* waktu antara  $t$  hingga  $t + dt$ . *Hazard rate* memiliki persamaan sebagai berikut,

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)}. \tag{4}$$

*Hazard rate* sebagai fungsi waktu diilustrasikan dengan kurva kegagalan yang disebut dengan *bathtub-shaped function*. Gambar 2.3 menunjukkan pembagian wilayah pada *bathtub curve* yaitu *early life region*, *constant failure-rate region*, dan *wear out region*.



Gambar 2.3 Kurva *Bathtub-Shaped* (Trivedi & Bobbio, 2017)



- *Constant Hazard*  
*Constant failure rate* (CFR) terjadi pada *constant failure-rate region*. *Failure rate* suatu unit tidak mengikuti suatu pola yang dapat diprediksi melainkan terjadi secara acak. *Constant hazard rate* memiliki fungsi sebagai berikut,

$$h(t) = \lambda. \tag{5}$$

- *Linearly Increasing Hazard*  
*Increasing failure rate* (IFR) terjadi pada *wear out region*. *Failure rate* pada *wear out region* meningkat secara signifikan dan tidak terjadi secara acak melainkan disebabkan oleh penuaan komponen. *Linearly increasing hazard* memiliki fungsi sebagai berikut,

$$h(t) = \lambda t. \tag{6}$$

- *Linearly Decreasing Hazard*  
*Decreasing failure rate* (DFR) terjadi pada *early life region*. *Sample* memiliki *failure rate* yang tinggi pada awalnya yang disebabkan oleh adanya kecacatan komponen yang belum dihilangkan. *Linearly decreasing hazard* memiliki fungsi sebagai berikut,

$$h(t) = a - bt, \quad a \geq bt. \tag{7}$$

#### 2.4.3 Mean Time to Failure (MTTF)

*Mean time to failure* (MTTF) merupakan rata-rata waktu antar kerusakan yang terjadi pada *nonrepairable system*. MTTF dapat merepresentasikan berapa lama suatu mesin diharapkan dapat dijalankan sebelum terjadinya kegagalan (Campbell, *et al.*, 2011). *Expected value* dari momen pertama suatu data seringkali disebut sebagai MTTF. Berikut merupakan persamaan yang digunakan untuk menghitung MTTF,

$$MTTF = E[X] = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt = \int_0^{\infty} R(t) dt . \quad (8)$$

#### 2.4.4 Distribusi Data Waktu Antar Kerusakan

Data waktu kerusakan komponen atau peralatan memiliki distribusi yang berbeda-beda. Pola distribusi yang menggambarkan waktu kerusakan diantaranya distribusi *normal*, distribusi *lognormal*, distribusi *exponential*, dan distribusi *Weibull*.

##### 1. Distribusi *Normal*

Distribusi normal memiliki parameter  $\mu$  dan  $\sigma$  dan memiliki bentuk *bell curve*. *Hazard rate* pada distribusi normal merupakan IFR. Berikut merupakan fungsi probabilitas pada distribusi normal,

$$R(t) = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^t \exp\left(-\frac{(u-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) du , \quad (9)$$

$$F(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^t \exp\left(-\frac{(u-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) du , \quad (10)$$

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] . \quad (11)$$

##### 2. Distribusi *Lognormal*

Distribusi *lognormal* merupakan distribusi yang banyak digunakan untuk merepresentasikan waktu perbaikan komponen yang gagal. *Hazard rate* pada distribusi *lognormal* merupakan IFR dan DFR. Berikut merupakan fungsi probabilitas pada distribusi *lognormal*,

$$R(t) = 1 - \int_0^t \frac{1}{\tau\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln \tau - \mu}{\sigma}\right)^2\right] d\tau , \quad (12)$$

$$F(t) = \int_0^t \frac{1}{\tau\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln \tau - \mu}{\sigma}\right)^2\right] d\tau , \quad (13)$$

$$f(t) = \frac{1}{\sigma t \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{\ln t - \mu}{\sigma} \right)^2 \right], \quad (14)$$

$$MTTF = \exp \left( \mu + \frac{\sigma^2}{2} \right). \quad (15)$$

### 3. Distribusi *Exponential*

Distribusi *exponential* merupakan distribusi probabilitas yang banyak digunakan dalam analisis *maintainability*, *maintenance*, dan *reliability*. Distribusi eksponensial memiliki parameter  $\lambda$  dan menggambarkan *constant failure rate*. Berikut merupakan fungsi probabilitas pada distribusi *exponential*,

$$R(t) = e^{-\lambda t}, \quad (16)$$

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t}, \quad (17)$$

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}, \quad (18)$$

$$MTTF = \frac{1}{\lambda}. \quad (19)$$

### 4. Distribusi *Weibull*

Distribusi *Weibull* merupakan distribusi yang dapat merepresentasikan berbagai kondisi kegagalan baik pada DFR, CFR, maupun IFR. Distribusi *Weibull* memiliki *shape parameter* ( $\beta$ ) dan *scale parameter* ( $\eta$ ). Berikut merupakan fungsi probabilitas pada distribusi *Weibull*,

$$R(t) = \exp \left[ -\left( \frac{t}{\eta} \right)^\beta \right], \quad (20)$$

$$F(t) = 1 - \left( \exp \left[ -\left( \frac{t}{\eta} \right)^\beta \right] \right), \quad (21)$$

$$f(t) = \left( \frac{\beta}{\eta} \right) \left( \frac{t}{\eta} \right)^{\beta-1} \exp \left[ -\left( \frac{t}{\eta} \right)^\beta \right], \quad (22)$$

$$h(t) = \lambda(t) = \left(\frac{\beta}{\eta}\right) \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1}, \quad (23)$$

$$MTTF = \lambda^{-\frac{1}{\beta}} \Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right). \quad (24)$$

#### 2.4.5 Repairable dan Nonrepairable Unit

Suatu sistem terdiri dari bagian yang lebih kecil seperti subsistem dan komponen. Jika  $A$  merupakan unit tunggal yang mewakili komponen dalam sistem, maka  $A$  dapat berada pada dua kondisi saling lepas yaitu *working (up)* dan *failed (down)*. Kegagalan menyebabkan unit berpindah dari kondisi *up* ke kondisi *down*. Perpindahan kondisi dari *up* ke *down* memberikan dua kasus yang dapat dipertimbangkan yaitu unit merupakan *nonrepairable unit* atau *repairable unit*. Suatu unit merupakan *nonrepairable unit* apabila unit mencapai kondisi *down* maka unit akan berada pada kondisi *down* selamanya. Sedangkan pada *repairable unit*, unit yang mencapai kondisi *down* dapat diperbaiki untuk mengembalikan unit ke kondisi *up*. Pada *nonrepairable unit*, analisis dilakukan terhadap keandalan unit sedangkan pada *repairable unit*, analisis dilakukan terhadap *maintainability* dan *availability* unit.

#### 2.4.6 Keandalan Sistem

Pengukuran yang dilakukan dalam keandalan seperti fungsi keandalan, fungsi *hazard*, dan MTTF dapat diterapkan baik untuk komponen maupun sistem. Sistem terdiri dari kumpulan komponen yang disusun berdasarkan desain yang spesifik untuk mencapai fungsi yang diinginkan dengan kinerja yang dapat diterima dan ukuran keandalan (Elsayed, 2012). Tipe komponen yang digunakan, kualitas komponen, dan konfigurasi komponen memberikan dampak langsung terhadap kinerja dan keandalan sistem.

Tahap pertama dari evaluasi keandalan sistem yaitu pembuatan *reliability block diagram*. *Reliability block diagram* digunakan untuk memberikan gambaran mengenai konfigurasi komponen dalam sistem dan bagaimana komponen tersebut saling terhubung. Tahap selanjutnya yaitu penentuan keandalan sistem secara keseluruhan. Konfigurasi sistem dapat mempengaruhi keandalan sistem. Berikut

merupakan perhitungan keandalan sistem pada sistem seri, sistem paralel, sistem *k-out-of-n*, dan sistem *standby*.

1. Sistem Seri

Sistem seri terdiri dari  $n$  komponen atau subsistem yang terhubung secara seri. Pada sistem seri, kegagalan suatu komponen akan berakibat pada kegagalan keseluruhan sistem. Jika  $R_i(t)$  merupakan keandalan komponen  $i$  pada waktu  $t$  maka keandalan sistem pada sistem seri yaitu,

$$R_s(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) . \quad (26)$$

2. Sistem Paralel

Sistem paralel terdiri dari  $n$  komponen yang terhubung secara paralel. Pada sistem paralel kegagalan suatu komponen memungkinkan sistem tetap dapat berfungsi. Jika  $R_i(t)$  merupakan keandalan komponen  $i$  pada waktu  $t$  maka keandalan sistem pada sistem paralel yaitu,

$$R_s(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i(t)) . \quad (27)$$

3. Sistem *k-out-of-n*

Sistem *k-out-of-n* akan berfungsi apabila setidaknya ada  $i \geq k$  komponen yang berfungsi dengan benar. Fungsi keandalan sistem *k-out-of-n* yaitu,

$$R_s(t) = \sum_{i=k}^n C(i, n) R(t)^i (1 - R(t))^{n-i} . \quad (28)$$

4. Sistem *Standby*

Sistem *standby* merupakan sistem dengan struktur *redundancy* di mana komponen *standby* akan digunakan apabila komponen utama mengalami kegagalan. Terdapat dua kondisi pada sistem *standby* yaitu *perfect switch* dan *imperfect switch*. Pada kasus *perfect switch*, sistem akan mengalami kegagalan jika seluruh komponen dalam sistem mengalami kegagalan. Pada kasus *imperfect*

*switch*, sistem dapat mengalami kegagalan yang disebabkan oleh kegagalan pada komponen *switching*. Keandalan sistem pada kasus *perfect switch* yaitu,

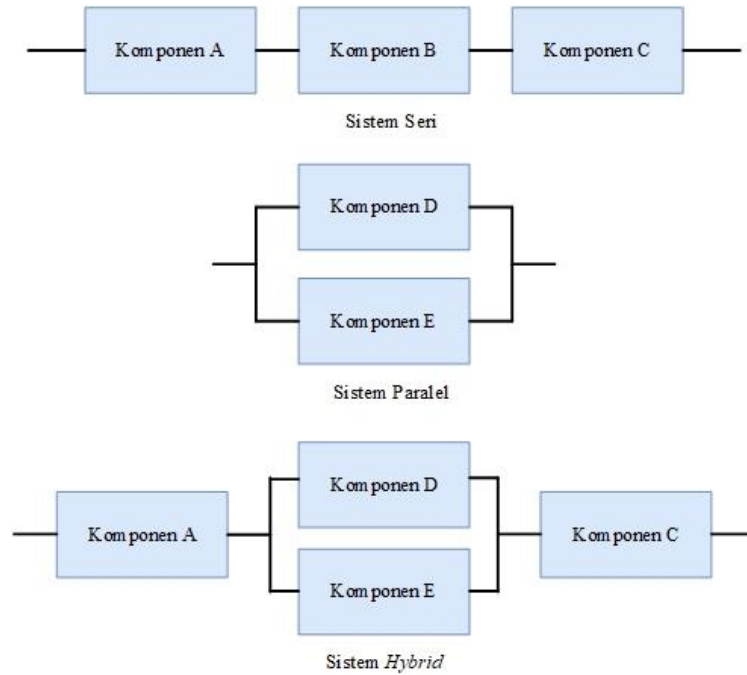
$$R_s(t) = R_1(t) * R_2(t) * \dots * : \text{konvolusi.} \quad (29)$$

Peningkatan keandalan sistem dilakukan dengan meningkatkan keandalan komponen kritis yang ditentukan melalui *reliability importance measure*. *Importance measure* digunakan untuk mengidentifikasi komponen kritis dalam sistem. *Importance measure*  $IR_i$  merupakan probabilitas komponen  $i$  kritis terhadap kegagalan sistem (Soleimani, *et al.*, 2014). *Importance measure* dapat digunakan untuk melakukan identifikasi dan perbaikan terhadap komponen kritis. Nilai dari *reliability importance* bergantung pada nilai keandalan komponen dan posisi komponen dalam sistem. Indeks yang digunakan dalam *importance measure* yaitu *Birnbaum importance index*. *Birnbaum importance index* dapat dihitung dengan persamaan berikut,

$$I_i = \frac{\partial R_s}{\partial R_i} . \quad (30)$$

#### 2.4.7 Reliability Block Diagram

*Reliability block diagram* merupakan salah satu model keandalan yang merepresentasikan karakteristik keandalan sistem. Metode *reliability block diagram* (RBD) mempertimbangkan keandalan setiap blok untuk mengevaluasi keandalan atau ketersediaan keseluruhan sistem (Trivedi & Bobbio, 2017). RBD menunjukkan hubungan antar komponen yang diperlukan untuk keberhasilan sistem. Ide dasar dari RBD yaitu sistem akan beroperasi jika setidaknya ada satu jalur dari *input* ke *output* (Bauer, *et al.*, 2009). Pembuatan RBD diawali dengan mengetahui *reliability* atau *availability* dari setiap blok dan pendefinisian mengenai hubungan antar blok. Hubungan antara blok dalam RBD dapat berupa hubungan seri, paralel, dan *k-out-of-n*. Pukite dan Pukite (1998) menjelaskan manfaat dari penggunaan RBD yaitu RBD merupakan model yang sederhana, terkenal, mudah dievaluasi, dan banyak digunakan sebagai titik awal dalam analisis keandalan sistem.



Gambar 2.4 *Reliability Block Diagram* Umum (Bauer, *et al.*, 2009)

## 2.5 Distribusi *Phase-Type*

Pada subbab ini akan dijelaskan mengenai distribusi *phase-type*, operasi *kroncker*, dan pendekatan distribusi *phase-type* untuk keandalan.

### 2.5.1 Distribusi *Phase-Type*

*State* pada Markov chain dapat diklasifikasikan menurut apakah mungkin untuk berpindah dari suatu *state* ke *state* lainnya (Buchholz, *et al.*, 2014). *State* yang ada pada Markov chain diantaranya yaitu *absorbing state* dan *transient state*. Jika  $C$  merupakan *subset* dari *state space*  $S$  dan  $C$  terdiri dari *single state*  $i$  maka  $i$  merupakan *absorbing state* dengan  $P(i, i) = 1$ . *State*  $i$  merupakan *transient state* jika probabilitas untuk kembali ke *state*  $i$  setelah meninggalkan *state*  $i$  yaitu kurang dari 1.

Distribusi *phase-type* didefinisikan sebagai distribusi dari *lifetime*  $X$  yaitu waktu untuk memasuki *absorbing state* dari sekumpulan *transient state*  $S_T$  pada *absorbing continuous time Markov process* (Buchholz, *et al.*, 2014). Variabel acak *phase-type* (PH) merupakan *time to absorption* pada CTMC homogen dengan satu *absorbing state* dan distribusinya merupakan *phase-type* (PH) *distribution* (Trivedi & Bobbio, 2017). Jika  $S$  merupakan *state space* terbatas dari *continuous time absorbing Markov process*  $\{X(t)\}_{t \geq 0}^{\infty}$  dan terdiri dari *set state* transisi

$S_T = \{1, \dots, n\}$  dan *single absorbing state*  $n + 1$  maka *infinitesimal generator matrix*  $\mathbf{Q}$  yaitu,

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{b} \\ \mathbf{0} & 0 \end{bmatrix}. \quad (31)$$

$\mathbf{Q}$  merupakan matriks yang jumlah barisnya sama dengan 0.  $\mathbf{A}$  merupakan sub matriks  $n \times n$  yang mendeskripsikan transisi antar *transient state*.  $\mathbf{b}$  merupakan vektor  $n \times 1$  yang menunjukkan intensitas transisi dari *transient state* ke *absorbing state*. Vektor baris  $\mathbf{0}$  menunjukkan bahwa tidak ada transisi dari *absorbing state* menuju ke *transient state* yang dapat terjadi. Elemen lain dari matriks  $\mathbf{Q}$  yaitu 0 yang menunjukkan *transition rate* yang keluar dari *absorbing state*. Variabel acak  $X$  mendeskripsikan *time till absorption* adalah *phase-type* dengan representasi  $(\mathbf{a}, \mathbf{A})$ . Vektor  $\mathbf{a} = [a(1), \dots, a(n)]$  merepresentasikan probabilitas inisial dari *transient state* dan  $a(n + 1)$  merepresentasikan probabilitas proses dimulai dari *absorbing state*.  $\mathbf{A}$  merupakan matriks *nonsingular* dan mengikuti  $\mathbf{b} = -\mathbf{A}\mathbf{u}$ . Dengan demikian maka diasumsikan bahwa tidak ada proses yang dimulai dari *absorbing state*.

Neuts (1994) memperlihatkan bahwa  $F(\cdot)$  Merupakan distribusi probabilitas *time till absorption*. Distribusi *phase-type* dengan representasi  $(\mathbf{a}, \mathbf{A})$  memiliki fungsi distribusi yaitu,

$$F(x) = 1 - \mathbf{a}e^{\mathbf{A}x}\mathbf{u} \text{ untuk } x \geq 0, \quad (32)$$

dengan *density function* sebagai berikut,

$$f(x) = \mathbf{a}e^{\mathbf{A}x}\mathbf{u} \text{ untuk } x \geq 0. \quad (33)$$

Momen ke  $I$  dari variabel acak  $X$  yaitu,

$$E[X^i] = (-1)^i i! (\mathbf{a}\mathbf{A}^{-i}\mathbf{u}) \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (34)$$

*Expected total time* merupakan waktu yang dihabiskan di *state j* sebelum *absorption* terjadi sehingga didapatkan rata-rata kejadian yaitu,

$$\lambda = \frac{1}{E[X]}, \quad (35)$$

dengan *squared coefficient of variation* sebagai berikut

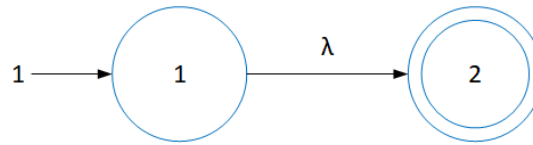


$$C^2 = \frac{E[X^2]}{(E[X])^2} - 1. \quad (36)$$

Distribusi *phase-type* memiliki beberapa bentuk seperti *exponential*, *erlang*, *hypo-exponential*, *hyper-exponential*, *hyper-erlang* dan *coxian*. Berikut merupakan bentuk distribusi *phase-type* menurut Buchholz (2014).

### 1. Distribusi *Exponential*

Distribusi eksponensial memiliki karakteristik berupa *rate parameter*  $\lambda$  dan merupakan bentuk paling sederhana dari distribusi *phase-type* dengan *single transient state*. Distribusi eksponensial memiliki *infinitesimal generator matrix*  $\mathbf{D}_0 = [-\lambda]$  dan *exit vector*  $\mathbf{d}_1 = [\lambda]$ .



Gambar 2.5 Distribusi Eksponensial (Buchholz, *et al.*, 2014)

Distribusi eksponensial memiliki *density function* yaitu,

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x} \quad \text{untuk } x \geq 0, \quad (37)$$

dan memiliki fungsi distribusi yaitu,

$$F(x) = 1 - e^{-\lambda x} \quad \text{untuk } x \geq 0, \quad (38)$$

dengan rata-rata kejadian

$$E[X] = \frac{1}{\lambda}, \quad (39)$$

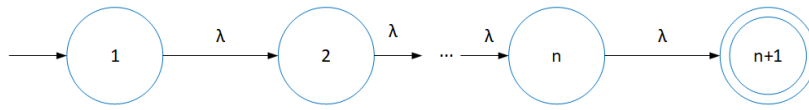
dan *variance*

$$VAR[X] = \frac{1}{\lambda^2}. \quad (40)$$

### 2. Distribusi *Erlang*

Distribusi erlang merupakan distribusi yang terdiri dari penjumlahan  $n$  *phases* eksponensial dengan *rate*  $\lambda$  yang sama. Distribusi erlang dinotasikan

dengan  $E(n, \lambda)$  dan memiliki *squared coefficient of variation*  $C^2 = n^{-1}$  yang bernilai kurang dari 1 untuk  $n > 1$ .



Gambar 2.6 Distribusi *Erlang* (Buchholz, et al., 2014)

Distribusi erlang memiliki *density function* yaitu,

$$f(x) = \frac{\lambda^n}{(n-1)!} x^{n-1} e^{-\lambda x} \text{ untuk } x \geq 0, \quad (41)$$

dan memiliki fungsi distribusi yaitu,

$$F(x) = 1 - \sum_{i=0}^{n-1} \frac{(\lambda x)^i}{i!} e^{-\lambda x} \text{ untuk } x \geq 0, \quad (42)$$

dengan rata-rata kejadian

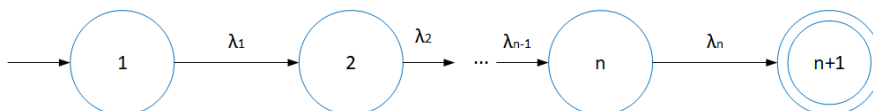
$$E[Y] = \frac{n}{\lambda}, \quad (43)$$

dan *variance*

$$VAR[Y] = \frac{n}{\lambda^2}, \quad (44)$$

### 3. Distribusi *Hypo-Exponential*

Distribusi *hypo-exponential* merupakan distribusi yang terdiri dari  $n$  *phases* dan perpindahan antar *phase* memiliki *rate* yang berbeda.



Gambar 2.7 Distribusi *Hypo-Exponential* (Buchholz, et al., 2014)

Distribusi *hypo-exponential* memiliki *density function* yaitu,

$$f(x) = \sum_{i=1}^n \left( \prod_{j=1, j \neq i}^n \frac{\lambda(j)}{\lambda(j) - \lambda(i)} \right) f_i(x) \quad \text{untuk } x \geq 0,$$

$$\lambda(i) \neq \lambda(j) \quad \text{untuk } i \neq j, \quad (45)$$

dengan rata-rata kejadian

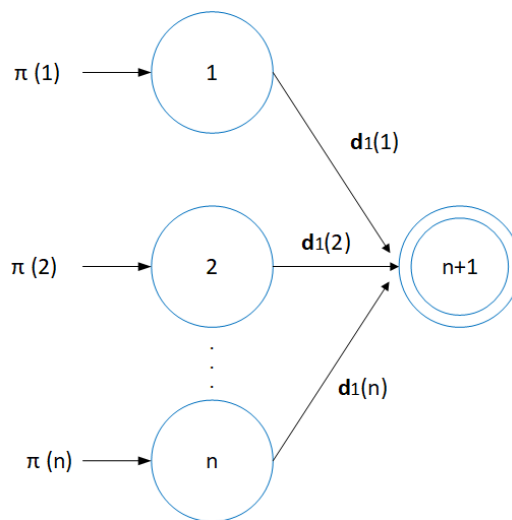
$$E[X] = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda(i)}, \quad (46)$$

dan *variance*,

$$VAR[X] = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda(i)^2}. \quad (47)$$

#### 4. Distribusi *Hyper-Exponential*

Distribusi *hyper-exponential* merupakan distribusi yang terdiri dari  $n$  *phases* dan proses dapat dimulai dari setiap *phase*.



Gambar 2.8 Distribusi *Hyper-Exponential* (Buchholz, *et al.*, 2014)

Distribusi *hyper-exponential* memiliki *density function* yaitu,

$$f(x) = \sum_{i=1}^n \pi(i) \lambda(i) e^{-\lambda(i)x} \quad \text{untuk } x \geq 0, \quad (48)$$

dengan  $\pi(i) > 0$  untuk setiap *phase*  $i$  dan  $\sum_{i=1}^n \pi(i) = 1$ . Distribusi *hyper-exponential* memiliki fungsi distribusi yaitu,

$$F(x) = \sum_{i=1}^n \pi(i)(1 - e^{-\lambda(i)x}) \text{ untuk } x \geq 0 . \quad (49)$$

Rata-rata kejadian pada distribusi *hyper-exponential* yaitu,

$$E[X] = \sum_{i=1}^n \frac{\pi(i)}{\lambda(i)} , \quad (50)$$

dan *variance*

$$VAR[X] = 2 \sum_{i=1}^n \frac{\pi(i)}{\lambda(i)^2} - \left( \sum_{i=1}^n \frac{\pi(i)}{\lambda(i)} \right)^2 . \quad (51)$$

## 5. Distribusi *Hyper-Erlang*

Distribusi *hyper-erlang* yang dinotasikan dengan HerD merupakan distribusi yang terdiri dari  $m$  *mutually independent* distribusi erlang yang dibobotkan dengan probabilitas inisial  $\pi(1), \dots, \pi(m)$  dengan  $\pi(i) \geq 0$  dan vektor  $\pi$  stokastik.  $s_i$  dinotasikan sebagai *phase* dari distribusi erlang ke  $i$ . Distribusi *hyper-erlang* memiliki *density function* yaitu,

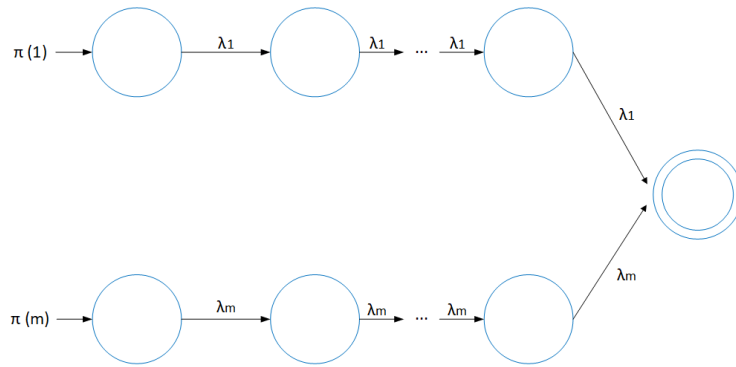
$$f(x) = \sum_{i=1}^m \pi(i) \frac{(\lambda(i)x)^{s_i-1}}{(s_i-1)!} \lambda(i) e^{-\lambda(i)x} \text{ untuk } x \geq 0 , \quad (52)$$

dan fungsi distribusi yaitu,

$$F(x) = 1 - \sum_{i=1}^m \pi(i) \sum_{j=0}^{s_i-1} \frac{(\lambda(i)x)^j}{j!} e^{-\lambda(i)x} \text{ untuk } x \geq 0 , \quad (53)$$

dengan rata-rata kejadian

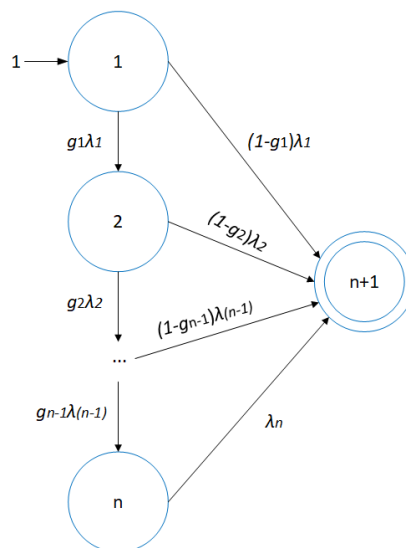
$$E[X] = \sum_{j=1}^m \pi(i) \frac{(s_j + i - 1)!}{(s_j - 1)!} \frac{1}{\lambda(j)^i} . \quad (54)$$



Gambar 2.9 Distribusi *Hyper-Erlang* (Buchholz, et al., 2014)

## 6. Distribusi *Coxian*

Distribusi *coxian* merupakan gabungan dari distribusi *hypo-exponential* dan *hyper-exponential*. Distribusi *coxian* memiliki *initial probability vector*  $\pi = [1, 0, \dots, 0]$ . Proses dimulai dari *phase 1* dan akan melewati  $n$  *phases* dengan *rate*  $\lambda(i)$  yang berbeda.



Gambar 2.10 Distribusi *Coxian* (Buchholz, et al., 2014)

### 2.5.2 Operasi *Kronecker*

Sejumlah operasi pada distribusi *phase-type* mengarah lagi ke distribusi *phase-type* (Neuts, 1994). Sifat tersebut dikenal dengan *closure properties*. Distribusi *phase-type* memiliki beberapa *closure properties*. *Properties* yang menggunakan operasi matriks aljabar dikenal sebagai operasi *Kronecker* yang meliputi *Kronecker product* dan *Kronecker sum* (Alkaff & Qomarudin, 2020).

Jika  $\mathbf{A} = [A_{ij}]$  dan  $\mathbf{B} = [B_{ij}]$  merupakan matriks persegi panjang dengan dimensi masing-masing  $m_1 \times m_2$  dan  $n_1 \times n_2$  maka *Kronecker product* dari  $\mathbf{A} \otimes \mathbf{B}$  adalah matriks dengan dimensi  $m_1 n_1 \times m_2 n_2$ ,

$$\mathbf{A} \otimes \mathbf{B} = \begin{bmatrix} A_{11} \mathbf{B} & \cdots & A_{1m_2} \mathbf{B} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{m_1 1} \mathbf{B} & \cdots & A_{m_1 m_2} \mathbf{B} \end{bmatrix}. \quad (55)$$

*Kronecker sum* dari matriks  $\mathbf{A}$  dan  $\mathbf{B}$  dengan dimensi  $m$  dan  $n$  yaitu,

$$\mathbf{A} \oplus \mathbf{B} = \mathbf{A} \otimes \mathbf{I}_n + \mathbf{I}_m \otimes \mathbf{B}. \quad (56)$$

Berikut merupakan beberapa sifat penting yang terdapat dalam operasi *Kronecker*:

$$(\mathbf{A} \otimes \mathbf{C})(\mathbf{B} \otimes \mathbf{D}) = \mathbf{AB} \otimes \mathbf{CD}, \quad (57)$$

$$e^{A_1 t} \otimes e^{A_2 t} = e^{(A_1 \oplus A_2) t}. \quad (58)$$

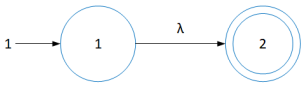
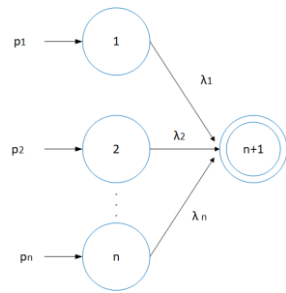
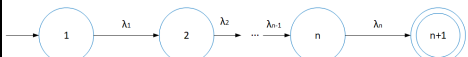
### 2.5.3 Pendekatan Distribusi Phase-Type untuk Keandalan

Distribusi *phase-type* banyak digunakan dalam memodelkan sistem stokastik yang kompleks dan analisisnya. Distribusi *phase-type* telah digunakan untuk sistem risiko, sistem kesehatan, dan pemodelan keandalan. Di dalam pemodelan keandalan, *transient state* merepresentasikan *good condition* dan *absorbing state* merepresentasikan *failed condition*. Transisi dari satu *good state* ke *good state* yang lain merepresentasikan perubahan kondisi komponen yang dapat disebabkan oleh penurunan kondisi atau penuaan. Terdapat berbagai keuntungan dari penggunaan distribusi *phase-type* dalam analisis keandalan sistem. Distribusi *phase-type* dapat mendekati berbagai distribusi acak sehingga dapat meningkatkan fleksibilitas dan kegunaan analisis keandalan sistem dan dapat merepresentasikan semua distribusi dengan dukungan terbatas pada bilangan bulat non negatif (Kim & Kim, 2016). Kim dan Kim (2016) juga menjelaskan bahwa distribusi *phase-type* dapat mensimulasikan berbagai pola kegagalan sehingga model stokastik menjadi lebih akurat dalam memperkirakan kinerja dari keandalan sistem. Model distribusi *phase-type* menyediakan alternatif untuk menghitung konvolusi dan memberikan ekspresi yang mudah dievaluasi untuk pengukuran keandalan; fungsi keandalan,

*probability density function*, dan momen *lifetime* (Riascos-Ochoa *et al.*, 2014). Alkaff dan Qomarudin (2020) menjelaskan beberapa keuntungan penggunaan distribusi *phase-type* dalam analisis keandalan sistem yaitu, (1) distribusi *phase-type* dapat digunakan sebagai model pengganti untuk *constant failure rate* (CFR), *increasing failure rate* (IFR), dan *decreasing failure rate* (DFR), bahkan distribusi dengan *failure rate* yang meningkat dan menurun dalam bentuk *bathtub curves* (BFR) seperti pada distribusi *Weibull*, (2) distribusi *phase-type* memiliki *closure properties* yang berguna dalam mengekspresikan fungsi keandalan sistem dalam hal fungsi keandalan komponen, (3) distribusi *phase-type* dapat mengurangi kebutuhan integrasi numerik ke aljabar numerik dan dapat menghasilkan *simple closed form solution* untuk mendapatkan parameter pada berbagai sistem stokastik dan perhitungan MTTF menjadi lebih sederhana, dan (4) distribusi *phase-type* dapat diaplikasikan pada *multistate system* dengan *multistate* komponen karena orde dari distribusi *phase-type* dapat merepresentasikan banyak tingkatan kondisi baik sebelum terjadi kegagalan.

Berbagai distribusi acak dapat direpresentasikan sebagai distribusi *phase-type* dengan menggunakan parameter yang tepat. CFR, DFR, IFR, dan BFR dalam analisis keandalan dapat direpresentasikan sebagai distribusi *phase-type* dengan menggunakan pendekatan nilai *coefficient of variation* untuk data *lifetime* yang terbatas. Distribusi *n-stage hypo-exponential* dapat digunakan untuk memodelkan data *lifetime* dengan  $1/n < CVTTF^2 < 1$  dan komponen memiliki distribusi IFR. Distribusi *hyper-exponential* dapat digunakan untuk memodelkan data *lifetime* dengan  $CVTTF^2 > 1$  dan komponen memiliki distribusi DFR (Alkaff & Qomarudin, 2020). Pada kasus di mana terdapat cukup data *lifetime*, Faddy (1995) memilih distribusi *phase-type* yang tepat dengan mencocokkan kurva *hazard function*. Kurva *probability density function* dan *hazard rate* distribusi *phase-type* dapat mengikuti berbagai bentuk kurva berdasarkan parameter yang digunakan (Faddy, 1995). Faddy (1995) menunjukkan bahwa penambahan jumlah *phase* dapat membuat distribusi *phase-type* semakin mendekati bentuk distribusi empirisnya. Tabel 2.1 merupakan contoh distribusi *phase-type* dan representasinya dalam fungsi keandalan.

Tabel 2.1 Contoh Distribusi *Phase-Type* dalam Analisis Keandalan

No	Distribusi	Kategori	Representasi Fungsi Keandalan	
1	<i>Exponential</i> ( $\lambda$ )	CFR	Grafis	
			Skalar	$e^{-\lambda t}$
			Matriks	$n = 1 \quad \mathbf{a} = [1] \quad \mathbf{A} = [-\lambda]$
2	<i>n-stage Hyper-exponential</i> ( $p_i, \lambda_i$ )	DFR	Grafis	
			Skalar	$\sum_{i=1}^n p_i e^{-\lambda_i t}$
			Matriks	$n = n \quad \mathbf{a} = [p_1 p_2 \dots p_n]$ $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\lambda_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -\lambda_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & -\lambda_n \end{bmatrix}$
3	<i>n-stage Hypo-exponential</i> ( $\lambda_i$ )	IFR	Grafis	
			Skalar	$\sum_{i=1}^n \frac{e^{-\lambda_i x}}{p_i}$ dengan $p_i = \prod_{j=1, j \neq i}^n \left(1 - \frac{\lambda_j}{\lambda_i}\right)$
			Matriks	$n = n \quad \mathbf{a} = [1 \ 0 \ \dots \ 0]$ $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\lambda_1 & \lambda_1 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & -\lambda_2 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \dots & \dots & \dots & -\lambda_{n-1} & \lambda_{n-1} \\ 0 & 0 & \dots & 0 & -\lambda_n \end{bmatrix}$

Sumber: Alkaff & Qomarudin, 2020

Pengukuran keandalan dapat dilakukan dengan menggunakan fungsi keandalan, fungsi *hazard*, dan *mean time to failure*. Berikut merupakan pengukuran keandalan dengan menggunakan distribusi *phase-type* berdasarkan Alkaff dan



Qomarudin (2020). Fungsi keandalan komponen dengan menggunakan distribusi *phase-type* yaitu,

$$R(t) = P(T > t) = 1 - F_T(t) = \mathbf{a}e^{At}\mathbf{u} \quad t \geq 0 . \quad (59)$$

$T$  merupakan *lifetime* komponen. Fungsi *hazard* dengan menggunakan distribusi *phase-type* yaitu,

$$h(t) = -\frac{R'(t)}{R(t)} = -\mathbf{a}Ae^{At}\mathbf{u}(\mathbf{a}e^{At}\mathbf{u})^{-1} . \quad (60)$$

MTTF didapatkan dari Persamaan (34) sebagai berikut,

$$MTTF = E[T] = -\mathbf{a}A^{-1}\mathbf{u} . \quad (61)$$

$\beta$  merupakan *auxiliary variable* untuk menghindari inversi matriks sehingga dengan menggunakan variabel maka didapatkan persamaan sebagai berikut,

$$\beta = -\mathbf{a}A^{-1} , \quad (62)$$

atau,

$$\beta A = \mathbf{a} , \quad (63)$$

dengan melakukan substitusi Persamaan (61) dan (62) maka didapatkan MTTF sebagai berikut,

$$MTTF = -\beta\mathbf{u} . \quad (64)$$

Analisis keandalan sistem menggunakan distribusi *phase-type* membutuhkan beberapa *closure properties* dengan dasar operasi *kroncker* seperti yang telah dijelaskan pada Subbab 2.5.3. Berikut merupakan model yang digunakan pada struktur sistem seri, paralel, *k-out-of-n*, dan *standby* dengan *closure properties* yang digunakan dalam analisis keandalan sistem berdasarkan Alkaff dan Qomarudin (2020).

### 1. Sistem Seri

Pada sistem seri, *lifetime* sistem dimodelkan sebagai *minimum lifetime* dari komponen pada sistem seri. *Lifetime* dari sistem seri dapat dimodelkan sebagai berikut,

$$T_s = \min(T_1, T_2, \dots, T_N) . \quad (65)$$

Teorema yang digunakan pada sistem seri yaitu Teorema 1 dalam Alkaff & Qomarudin (2020). Pada Teorema 1, jika  $T_1$  dan  $T_2$  merupakan variabel acak tidak identik yang berdistribusi *phase-type* dengan representasi  $(n_1, \mathbf{a}_1, \mathbf{A}_1)$  dan  $(n_2, \mathbf{a}_2, \mathbf{A}_2)$  maka nilai minimum  $T_1$  dan  $T_2$  merupakan distribusi *phase type* dengan representasi  $(n_s, \mathbf{a}_s, \mathbf{A}_s)$  yang didapatkan dari Persamaan (66)-(68) sebagai berikut,

$$n_s = n_1 n_2 , \quad (66)$$

$$\mathbf{a}_s = \mathbf{a}_1 \otimes \mathbf{a}_2 , \quad (67)$$

$$\mathbf{A}_s = \mathbf{A}_1 \oplus \mathbf{A}_2 . \quad (68)$$

Pembuktian Teorema 1 dilakukan dengan menggunakan Persamaan (69)-(71) untuk  $i = 2, 3, \dots, N$  dengan kondisi awal seperti pada Persamaan (72) sebagai berikut,

$$n_s^{(i)} = n_s^{(i-1)} n_i , \quad (69)$$

$$\mathbf{a}_s^{(i)} = \mathbf{a}_s^{(i-1)} \otimes \mathbf{a}_i , \quad (70)$$

$$\mathbf{A}_s^{(i)} = \mathbf{A}_s^{(i-1)} \oplus \mathbf{A}_i , \quad (71)$$

$$n_s^{(1)} = n_1 \mathbf{a}_s^{(1)} = \mathbf{a}_1 \mathbf{A}_s^{(1)} = \mathbf{A}_1 . \quad (72)$$

$T_s$  dari sistem seri dengan representasi  $(n_s, \mathbf{a}_s, \mathbf{A}_s)$  pada Persamaan (65) dapat dituliskan kembali sebagai berikut,

$$T_s^{(i)} = \min(T_s^{(i-1)}, T_i) \text{ untuk } i = 2, 3, \dots, N . \quad (73)$$

## 2. Sistem Paralel

Pada sistem paralel, sistem akan mengalami kegagalan jika dan hanya jika semua komponen dalam sistem gagal. *Lifetime* dari sistem paralel dapat dimodelkan sebagai *maximum lifetime* dari *lifetime* komponen sebagai berikut,

$$T_s = \max(T_1, T_2, \dots, T_N). \quad (74)$$

Teorema yang digunakan pada sistem paralel yaitu Teorema 2 dalam Alkaff dan Qomarudin (2020). Pada Teorema 2, jika  $T_1$  dan  $T_2$  merupakan variabel acak tidak identik yang berdistribusi *phase-type* dengan representasi  $(n_1, \mathbf{a}_1, \mathbf{A}_1)$  dan  $(n_2, \mathbf{a}_2, \mathbf{A}_2)$  maka nilai maksimum  $T_1$  dan  $T_2$  merupakan distribusi *phase type* dengan representasi  $(n_s, \mathbf{a}_s, \mathbf{A}_s)$  yang didapatkan dari Persamaan (75)-(77) sebagai berikut,

$$n_s = n_1 n_2 + n_1 + n_2, \quad (75)$$

$$\mathbf{a}_s = [\mathbf{a}_1 \otimes \mathbf{a}_2, \mathbf{a}_2(n_2 + 1)\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_1(n_1 + 1)\mathbf{a}_2] = [\mathbf{a}_1 \otimes \mathbf{a}_2, \mathbf{0}, \mathbf{0}], \quad (76)$$

$$\mathbf{A}_s = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 \oplus \mathbf{A}_2 & \mathbf{I}_{n_1} \otimes \mathbf{b}_2 & \mathbf{b}_1 \otimes \mathbf{I}_{n_2} \\ \mathbf{0} & \mathbf{A}_1 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{A}_2 \end{bmatrix}. \quad (77)$$

$\mathbf{b}_1 = -\mathbf{A}_i \mathbf{u}$  dan  $\mathbf{a}_1(n_i + 1)$  merepresentasikan probabilitas proses dimulai dari *absorbing state* yang diasumsikan sama dengan 0. Blok  $\mathbf{A}_1 \oplus \mathbf{A}_2$  merepresentasikan produk fungsi *reliability* dari dua komponen di mana  $\mathbf{A}_1$  dan  $\mathbf{A}_2$  merepresentasikan fungsi *reliability* untuk setiap komponen.

Pembuktian Teorema 2 dilakukan dengan menggunakan Persamaan (78)-(80) untuk  $i = 2, 3, \dots, N$  dengan kondisi awal seperti pada Persamaan (72) sebagai berikut,

$$n_s^{(i)} = n_s^{(i-1)} n_i + n_s^{(i-1)} + n_i, \quad (78)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{a}_s^{(i)} &= [\mathbf{a}_s^{(i-1)} \otimes \mathbf{a}_i, \mathbf{a}_i(n_i + 1)\mathbf{a}_s^{(i-1)}, \mathbf{a}_s^{(i-1)}(n_s^{(i-1)} + 1)\mathbf{a}_i] \\ &= [\mathbf{a}_s^{(i-1)} \otimes \mathbf{a}_i, \mathbf{0}, \mathbf{0}], \end{aligned} \quad (79)$$

$$\mathbf{A}_s = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_s^{(i-1)} \oplus \mathbf{A}_i & \mathbf{I}_{n_s^{(i-1)}} \otimes \mathbf{b}_i & \mathbf{b}_s^{(i-1)} \otimes \mathbf{I}_{n_i} \\ \mathbf{0} & \mathbf{A}_s^{(i-1)} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{A}_i \end{bmatrix}. \quad (80)$$

$T_s$  dari sistem paralel dengan representasi  $(n_s, \mathbf{a}_s, \mathbf{A}_s)$  pada Persamaan (74) dapat dituliskan kembali sebagai berikut,

$$T_s^{(i)} = \max(T_s^{(i-1)}, T_i) \text{ untuk } i = 2, 3, \dots, N. \quad (81)$$

### 3. Sistem *k-out-of-n*

Pada sistem *k-out-of-n*, sistem akan beroperasi jika dan hanya jika setidaknya terdapat  $k$  komponen yang beroperasi dari  $n$  komponen yang ada. Sistem *k-out-of-n* dapat dimodelkan sebagai berikut,

$$T_s = \text{kofn}(T_1, T_2, \dots, T_N; K). \quad (82)$$

Teorema yang digunakan pada sistem *k-out-of-n* yaitu Teorema 3 dalam Alkaff dan Qomarudin (2020). Pada Teorema 3, jika  $T_1$  dan  $T_2$  merupakan variabel acak tidak yang berdistribusi *phase-type* dengan representasi  $(n_1, \mathbf{a}_1, \mathbf{A}_1)$  dan  $(n_2, \mathbf{a}_2, \mathbf{A}_2)$  maka penjumlahan  $T_1$  dan  $T_2$  merupakan distribusi *phase type* dengan representasi  $(n_s, \mathbf{a}_s, \mathbf{A}_s)$  yang didapatkan dari Persamaan (83)-(85) sebagai berikut,

$$n_s = n_1 + n_2, \quad (83)$$

$$\mathbf{a}_s = [\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_1(n_1 + 1)\mathbf{a}_2] = [\mathbf{a}_1, \mathbf{0}], \quad (84)$$

$$\mathbf{A}_s = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 & \mathbf{b}_1 \mathbf{a}_2 \\ \mathbf{0} & \mathbf{A}_2 \end{bmatrix}. \quad (85)$$

### 4. Sistem *Standby*

Pada sistem *standby* atau *cold standby*, suatu komponen *standby* akan beroperasi apabila komponen utama mengalami kegagalan. Komponen *standby* tidak mengalami penurunan kondisi ketika menunggu untuk digunakan. Pada kasus *perfect switch*, sistem akan mengalami kegagalan apabila semua komponen mengalami kegagalan. *Lifetime* pada kasus *perfect switch* dapat dimodelkan sebagai penjumlahan dari *lifetime* komponen sebagai berikut,

$$T_s = T_1 + T_2 + \dots + T_N = \text{add}(T_1, T_2, \dots, T_N). \quad (86)$$

$T_s$  pada Persamaan (86) memiliki representasi *phase-type*  $(n_s, \mathbf{a}_s, \mathbf{A}_s)$  yang dapat dibuktikan dengan menggunakan Persamaan (87)-(89) sebagai berikut,

$$n_s^{(i)} = n_s^{(i-1)} + n_i, \quad (87)$$

$$\mathbf{a}_s^{(i)} = [\mathbf{a}_s^{(i-1)}, a_s^{(i-1)}(n_s^{(i-1)} + 1)\mathbf{a}_i] = [\mathbf{a}_s^{(i-1)}, \mathbf{0}], \quad (88)$$

$$\mathbf{A}_s^{(i)} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_s^{(i-1)} & \mathbf{b}_s^{(i-1)} \mathbf{a}_i \\ \mathbf{0} & \mathbf{A}_i \end{bmatrix}. \quad (89)$$

Untuk  $i = 2, 3, \dots, N$  dengan kondisi awal seperti pada Persamaan (72) dan  $\mathbf{b}_s^{(i-1)} = -\mathbf{A}_s^{(i-1)}\mathbf{u}$  sehingga Persamaan (86) dapat dituliskan kembali sebagai berikut,

$$T_s^{(i)} = T_s^{(i-1)} + T_i \text{ untuk } i = 2, 3, \dots, N. \quad (90)$$

Pada kasus *imperfect switch*, dengan  $X_1$  merupakan variabel *Bernoulli* yang merepresentasikan kondisi *switch* ketika komponen pertama mengalami kegagalan, maka *lifetime* sistem *standby* dengan *imperfect switch* dapat dimodelkan sebagai berikut,

$$T_s = T_1 + X_1 \left( T_2 + X_2 \left( T_3 + X_3 \left( T_4 \dots + X_{N-1} T_N \right) \right) \right), \quad (91)$$

$$T_s = \text{add}(T_1, p_1, T_2, p_2, \dots, p_{N-1}, T_N). \quad (92)$$

$T_s$  pada Persamaan (91) memiliki representasi *phase-type*  $(n_s, \mathbf{a}_s, \mathbf{A}_s)$  yang dapat dibuktikan dengan menggunakan Persamaan (93)-(95) sebagai berikut,

$$n_s^{(i)} = n_s^{(i-1)} n_i, \quad (93)$$

$$\mathbf{a}_s^{(i)} = [\mathbf{a}_s^{(i-1)}, a_s^{(i-1)}(n_s^{(i-1)} + 1)\mathbf{a}_i] = [\mathbf{a}_s^{(i-1)}, \mathbf{0}], \quad (94)$$

$$\mathbf{A}_s^{(i)} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_s^{(i-1)} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & p_{i-1} \mathbf{b}_{i-1} \mathbf{a}_i + \mathbf{A}_i \end{bmatrix}. \quad (95)$$

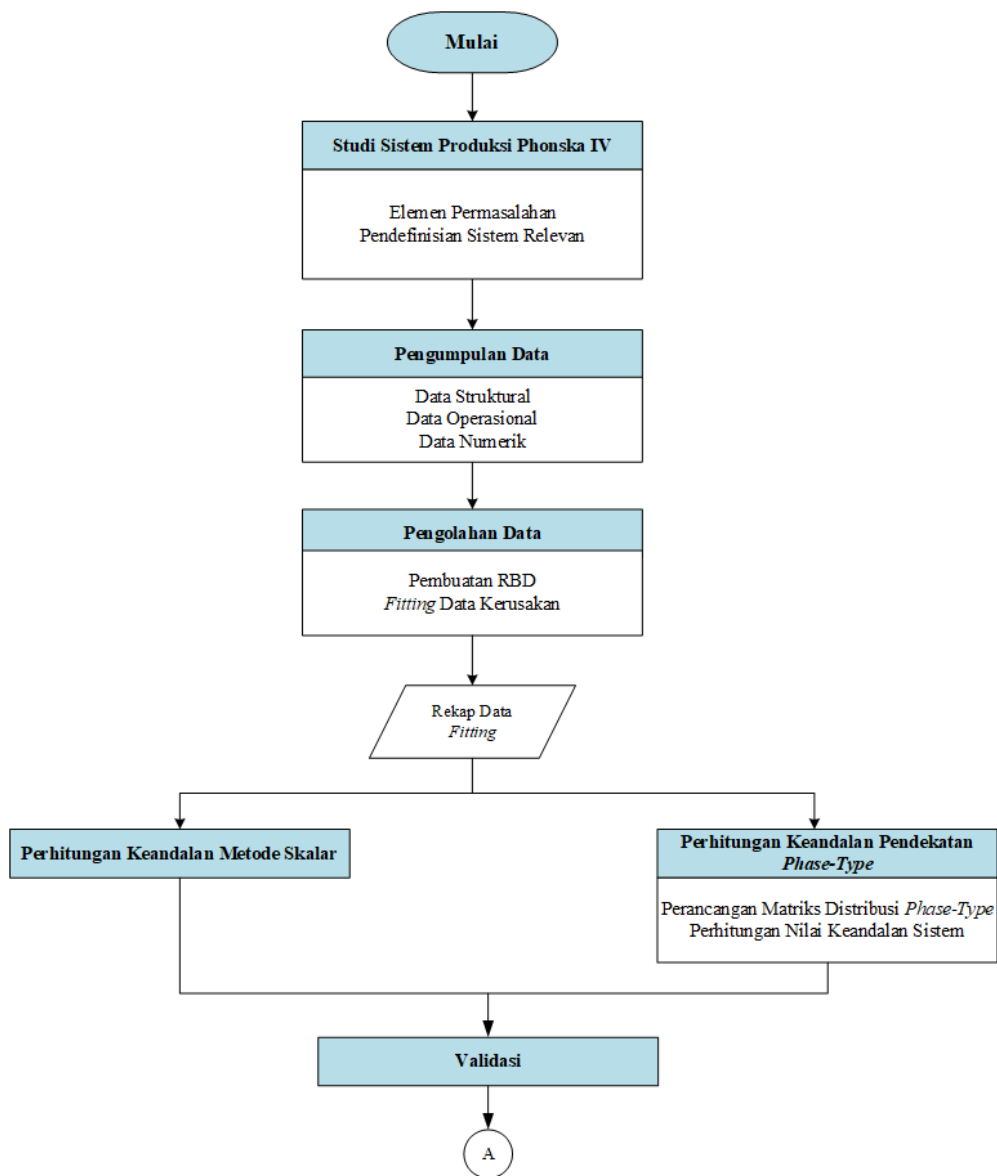
Untuk  $i = 2, 3, \dots, N$  dengan kondisi awal seperti pada Persamaan (72) dan  $\mathbf{b}_i = -\mathbf{A}_i \mathbf{u}$  sehingga Persamaan (91) dapat dituliskan kembali sebagai berikut,

$$T_s^{(i)} = T_s^{(i-1)} + X_{i-1} T_i \quad \text{untuk } i = 2, 3, \dots, N . \quad (96)$$

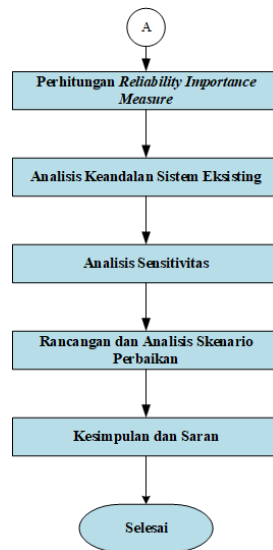
### BAB 3

## METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini dijelaskan mengenai tahapan yang dilakukan pada penelitian ini. Penelitian ini terdiri dari lima tahap yaitu, tahap studi sistem, tahap pengumpulan data, tahap pengolahan data, tahap analisis sistem eksisting dan usulan perbaikan sistem, serta tahap kesimpulan dan saran. Gambar 3.1 merupakan *flowchart* metodologi pada penelitian ini.



Gambar 3.1 *Flowchart* Metodologi Penelitian



Gambar 3.1 *Flowchart* Metodologi Penelitian (Lanjutan)

### 3.1 Studi Sistem Proses Produksi Phonska IV

Pada tahap ini dilakukan studi sistem mengenai sistem proses produksi Phonska IV. Studi sistem dilakukan melalui observasi lapangan dan diskusi dengan pihak Unit Pemeliharaan di Departemen Pemeliharaan II PT Petrokimia Gresik. Studi sistem dilakukan untuk mengetahui permasalahan yang akan dianalisis dan sistem relevannya. Studi sistem dilakukan melalui identifikasi terhadap masalah yang tepat dan pendefinisian sistem relevan.

Identifikasi masalah pada sistem dilakukan dengan mendefinisikan elemen permasalahan. Elemen permasalahan terdiri dari *decision maker*, *decision maker's objective*, *decision criterion*, *performance*, *alternative course of action*, dan *context*. Pendefinisian elemen permasalahan dilakukan berdasarkan hasil observasi lapangan dan diskusi dengan pihak Unit Pemeliharaan II. Berikut merupakan elemen permasalahan pada sistem produksi Phonska IV.

1. *Decision maker* pada permasalahan ini yaitu Manajer Pemeliharaan II PT Petrokimia Gresik.
2. *Decision maker's objective* pada permasalahan ini yaitu meningkatkan keandalan sistem pada Pabrik Phonska IV.
3. *Decision criterion* yaitu peningkatan keandalan sistem Pabrik Phonska IV.



4. *Performance* yaitu nilai keandalan sistem, nilai *hazard rate*, dan *mean time to failure* Pabrik Phonska IV.
5. *Alternative course of action* yaitu penambahan peralatan *redundant* dan penggantian peralatan.
6. *Context* permasalahan terjadi yaitu pada sistem produksi pupuk phonska di Pabrik Phonska IV.

*Breakdown* sistem dilakukan menjadi tiga *level* yaitu sistem, subsistem, dan peralatan. Tingkat sistem (*level 0*) merupakan Pabrik Phonska IV. Tingkat subsistem (*level 1*) merupakan subsistem yang ada di Pabrik Phonska IV yang terdiri dari delapan subsistem. Tingkat mesin dan peralatan (*level 2*) merupakan peralatan yang terdapat pada setiap subsistem.

### **3.2 Pengumpulan Data**

Pada tahap ini dilakukan pengumpulan data untuk pembuatan model konseptual berupa *reliability block diagram* dan perhitungan keandalan sistem. Pengumpulan data dilakukan melalui wawancara, data historis perusahaan, *benchmark*, *manual book*, dan *database offshore reliability data (OREDA) handbook*. *Benchmark* dilakukan dengan menggunakan data peralatan sejenis di pabrik lain. *OREDA handbook* merupakan proyek yang dilakukan oleh perusahaan minyak dan gas berupa *databank* keandalan dari peralatan *topside* dan *subsea* pada operasi *offshore* dan *onshore*. Terdapat tiga jenis data yang dikumpulkan pada penelitian ini yaitu data struktural, data operasional, dan data numerik. Data struktural merupakan data yang menampilkan struktur dari sistem. Data struktural digunakan untuk mengetahui struktur sistem produksi yang diamati. Data operasional merupakan data yang menunjukkan bagaimana sistem bekerja. Data operasional yang dikumpulkan berupa *process flow diagram* untuk mengetahui alur proses produksi pada sistem. Data struktural dan data operasional digunakan untuk membuat *reliability block diagram*. Data numerik merupakan data kuantitatif yang terdapat pada sistem yaitu data waktu antar kerusakan peralatan. Data waktu antar kerusakan peralatan didapatkan melalui data historis perusahaan tahun 2017 – 2019. Sedangkan untuk peralatan yang tidak memiliki data waktu antar kerusakan historis maka digunakan data dari *OREDA handbook*, *manual book* peralatan, dan

*benchmark*. Tabel 3.1 merupakan jenis data yang dibutuhkan dan metode pengumpulan data yang digunakan.

Tabel 3.1 Data yang Dibutuhkan dalam Penelitian

Jenis Data	Data yang Dibutuhkan	Status Data	Keterangan
Data Struktural	Struktur sistem Pabrik Phonska IV	Hasil wawancara	Wawancara dilakukan dengan Staf Departemen Pemeliharaan II pada tanggal 11 Februari 2020 – 3 Maret 2020.
Data Operasional	<i>Process Flow Diagram</i>	Tersedia	Didapatkan pada tanggal 11 Februari 2020.
Data Numerik	Data waktu antar kerusakan peralatan	Tersedia	Data historis perusahaan tahun 2017-2019. Didapatkan pada tanggal 21 Februari 2020.
	Data waktu antar kerusakan peralatan	Tidak tersedia	Didapatkan dari sumber data lain: <ul style="list-style-type: none"> <li>• OREDA <i>handbook</i></li> <li>• <i>Manual book</i></li> <li>• <i>Benchmark</i></li> </ul>

### 3.3 Pengolahan Data

Pengolahan data diawali dengan pembuatan *reliability block diagram* untuk merepresentasikan hubungan antar peralatan dalam sistem. Tahap selanjutnya yaitu *fitting* distribusi data kerusakan setiap peralatan untuk mengetahui jenis distribusi data yang akan digunakan sebagai *input* data dalam distribusi *phase-type*. Pembuatan matriks distribusi *phase-type* untuk menghitung keandalan sistem dilakukan berdasarkan hasil proses *fitting* distribusi yang didekatkan menggunakan nilai *coefficient of variation* dengan *trace-based fitting*. Perubahan distribusi data kerusakan menjadi distribusi *phase-type* dilakukan dengan menyesuaikan nilai *coefficient of variation* data kerusakan dengan distribusi *phase-type* yang sesuai seperti yang telah dijelaskan pada Tabel 2.1. Setelah mengetahui distribusi data kerusakan setiap peralatan selanjutnya dilakukan perhitungan keandalan sistem dengan menggunakan metode skalar konvensional dan metode matriks distribusi

*phase-type*. Validasi dilakukan pada pembuatan *reliability block diagram*, *fitting data* ke distribusi *phase-type*, dan hasil perhitungan nilai keandalan sistem. Setelah mengetahui nilai keandalan sistem maka langkah selanjutnya yaitu penentuan subsistem kritis dengan menggunakan *birnbaum's importance measure*. Peningkatan keandalan sistem dilakukan dengan cara meningkatkan keandalan peralatan pada subsistem kritis.

### **3.4 Analisis Sistem Eksisting dan Usulan Perbaikan Sistem**

Pada tahap ini dilakukan analisis terhadap pengolahan data yang telah dilakukan sebelumnya. Analisis dilakukan pada sistem eksisting meliputi fungsi keandalan, fungsi *hazard*, dan *mean time to failure*. Analisis sensitivitas digunakan sebagai dasar dari usulan perbaikan sistem. Faktor yang dianalisis dalam analisis sensitivitas diantaranya yaitu penambahan komponen *redundant* dengan struktur paralel dan *standby perfect switch* serta penggantian peralatan.

### **3.5 Kesimpulan dan Saran**

Pada tahap ini dilakukan pembuatan kesimpulan berdasarkan penelitian yang telah dilakukan untuk menjawab tujuan dari penelitian ini dan pemberian saran untuk penelitian selanjutnya.

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

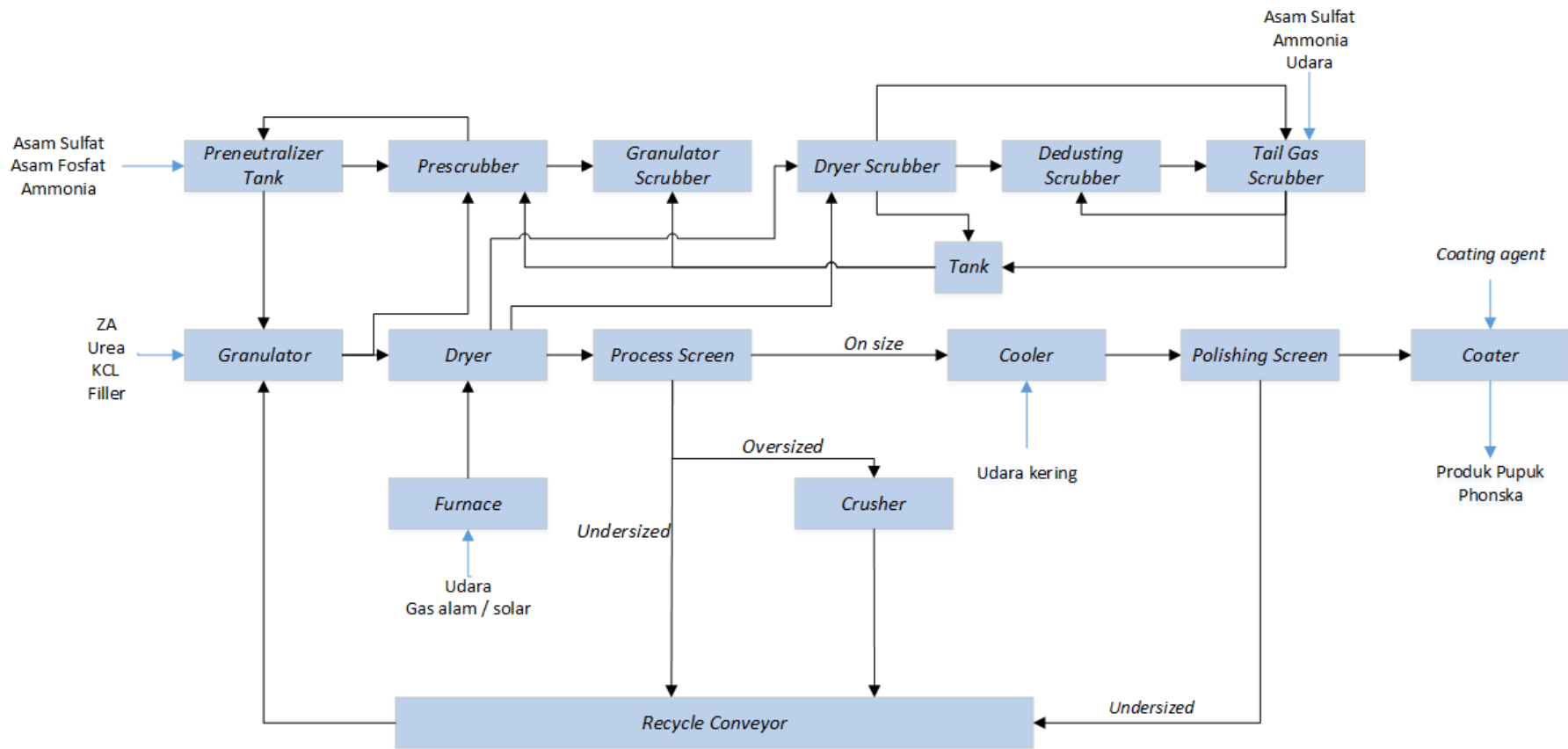
## BAB 4

### PENGUMPULAN DAN PENGOLAHAN DATA

Pada bab ini dijelaskan mengenai pengumpulan data dan pengolahan data yang dikumpulkan. Data yang dikumpulkan terdiri dari data kualitatif dan data kuantitatif. Data kualitatif berupa *process flow diagram* dan struktur sistem produksi Pabrik Phonska IV dan data kuantitatif berupa data waktu antar kerusakan peralatan. Pengolahan data dilakukan dengan membuat *reliability block diagram*, *fitting* data waktu antar kerusakan peralatan, *fitting* data waktu antar kerusakan peralatan ke distribusi *phase-type*, perhitungan keandalan sistem, dan penentuan subsistem kritis.

#### 4.1 Deskripsi Sistem Produksi Phonska IV

Proses produksi Pupuk Phonska merupakan proses produksi kontinyu yang terdiri dari beberapa proses yaitu penetralan bahan baku, granulasi, pengeringan, pendinginan, dan pelapisan. Proses produksi dimulai dengan memasukkan bahan baku cair yang terdiri dari asam fosfat, asam sulfat, dan *ammonia* ke dalam *preneutralizer tank* untuk dilakukan pencampuran. Setelah dilakukan pencampuran bahan baku cair dialirkan ke *granulator* untuk proses granulasi bersama dengan bahan baku padat berupa ZA, KCL, dan urea. *Output* produk dari proses granulasi selanjutnya dibawa ke mesin *dryer* untuk mengurangi kadar air produk. Produk yang telah dikeringkan selanjutnya disaring di *product screen* untuk memisahkan antara produk *on size*, *undersize*, dan *oversize*. Produk *oversize* akan dibawa ke *crusher* untuk dihancurkan. Produk *oversize* yang telah dihancurkan dibawa kembali ke *granulator* bersama dengan produk *undersize* untuk diproses kembali. Produk *on size* dibawa ke mesin *cooler* untuk dilakukan proses pendinginan. *Output* produk dari mesin *cooler* selanjutnya dibawa ke mesin *coating* untuk dilakukan pelapisan dan pewarnaan produk. Pelapisan dilakukan agar produk tidak menggumpal ketika disimpan. Produk yang telah dilapisi dan diwarnai selanjutnya dibawa ke gudang penyimpanan untuk dilakukan proses *packaging*. Gambar 4.1 merupakan alur proses produksi pupuk phonska.



Gambar 4.1 Diagram Alir Proses Pembuatan Pupuk Phonska

Peralatan yang terdapat di Pabrik Phonska IV diklasifikasikan menjadi peralatan mekanik, peralatan listrik, dan peralatan instrumentasi. Analisis keandalan sistem Pabrik Phonska IV dilakukan pada peralatan mekanik yang termasuk dalam *rotating equipment*. Tabel 4.1 merupakan daftar peralatan mekanik pada Pabrik Phonska IV.

Tabel 4.1 Daftar Peralatan Mekanik Pabrik Phonska IV

No	Kode	Peralatan
<i>Subsistem Pre Neutralizer</i>		
1	B-26M366	Pre Neutralizer Reactor Agitator
2	B-26P303A	Slurry Pump
3	B-26P303B	Slurry Pump
<i>Subsistem Solid Raw Material</i>		
4	B-26M215	Raw Material Bucket Elevator
5	B-26M216	Raw Material Conveyor
6	B-22M305	Recycle Bucket Elevator
7	B-22M304	Recycle Drag Flight Conveyor
<i>Subsistem Reaction Scrubbing &amp; Granulation</i>		
8	B-26P312A	Granulator Pre Scrubber Pump
9	B-26P312B	Granulator Pre Scrubber Pump
10	B-22P302A	Venturi Scrubber Pump
11	B-22P302B	Venturi Scrubber Pump
12	B-22P301A	Scrubber Pump
13	B-22P301B	Scrubber Pump
14	B-22P305A	Tower Scrubber Pump
15	B-22P305B	Tower Scrubber Pump
16	B-22P309	Sump pump
17	B-22M361	Granulator
<i>Subsistem Tail Gas Scrubber</i>		
18	B-26C302	Dryer Fan
19	B-26P313A	Tail Gas Scrubber Pump
20	B-26P313B	Tail Gas Scrubber Pump
21	B-26P313C	Tail Gas Scrubber Pump
22	B-26P313D	Tail Gas Scrubber Pump
<i>Subsistem Coal Burner</i>		
23	B-26C307	Combustion Air Fan
24	B-22Q303	Coal Crusher
25	B-22M365	Coal Bucket Elevator

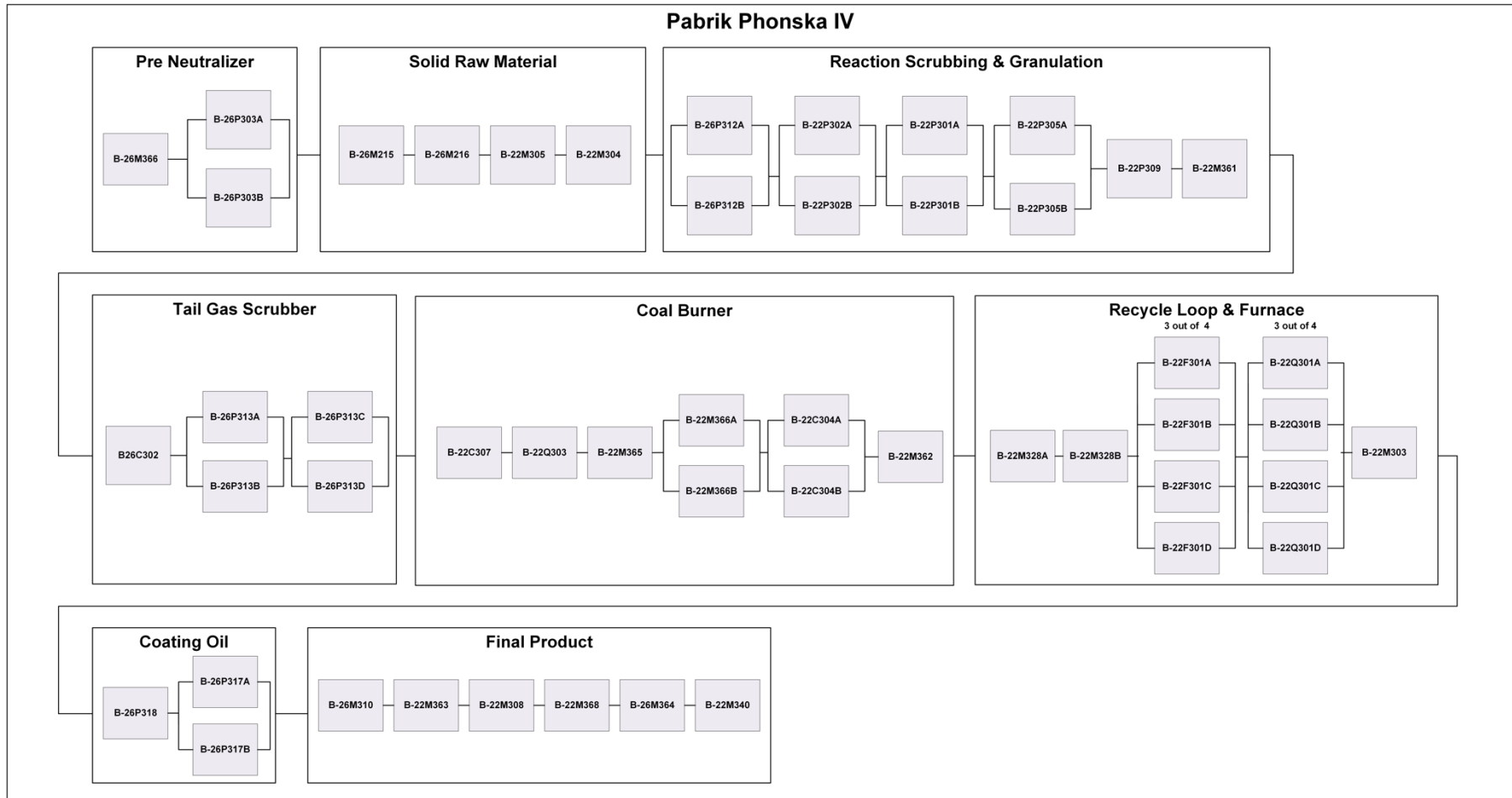
Tabel 4.1 Daftar Peralatan Mekanik Pabrik Phonska IV (Lanjutan)

No	Kode	Peralatan
26	B-22M366A	Coal Dish Feeder
27	B-22M366B	Coal Dish Feeder
28	B-26C304A	Cooler Fan
29	B-26C304B	Cooler Fan
30	B-22M362	Dryer
<i>Subsistem Recycle Loop &amp; Furnace</i>		
31	B-22M328A	Screen Feed Drag Conveyor
32	B-22M328B	Screen Feed Drag Conveyor
33	B-22F301A	Product Screen
34	B-22F301B	Product Screen
35	B-22F301C	Product Screen
36	B-22F301D	Product Screen
37	B-22Q301A	Oversize Crusher
38	B-22Q301B	Oversize Crusher
39	B-22Q301C	Oversize Crusher
40	B-22Q301D	Oversize Crusher
41	B-22M303	Screen Product Conveyor
<i>Subsistem Coating Oil</i>		
42	B-26P318	Coating Oil Feeding Pump
43	B-26P317A	Coating Oil Injection Pump
44	B-26P317B	Coating Oil Injection Pump
<i>Subsistem Final Product</i>		
45	B-26M310	Conveyor Recycle Regranulator
46	B-22M363	Cooler
47	B-22M308	Product Elevator
48	B-22M368	Coating Powder Feeder
49	B-26M364	Coater
50	B-22M340	Product Conveyor

#### 4.2 Reliability Block Diagram

Pembuatan *reliability block diagram* dilakukan berdasarkan *process flow diagram* dan didasarkan pada hubungan antar peralatan atau subsistem untuk membentuk sistem. Gambar 4.2 merupakan *reliability block diagram* Pabrik Phonska IV.





Gambar 4.2 Reliability Block Diagram Pabrik Phonska IV

Berdasarkan Gambar 4.2 pembuatan *reliability block diagram* dilakukan pada tingkat sistem (*level 0*), tingkat subsistem (*level 1*), dan tingkat mesin dan peralatan (*level 2*). Terdapat delapan subsistem di Pabrik Phonska IV yang terhubung secara seri. Subsistem tersebut yaitu subsistem *pre neutralizer*, subsistem *solid raw material*, subsistem *reaction scrubbing & granulation*, subsistem *tail gas scrubber*, subsistem *coal burner*, subsistem *recycle loop section & furnace*, subsistem *coating oil*, dan subsistem *final product*. Setiap subsistem terdiri dari beberapa peralatan dengan struktur seri, paralel, dan *k-out-of-n*. Validasi *reliability block diagram* yang telah dibuat dilakukan melalui *face validation* dengan *Engineer* Departemen Pemeliharaan II PT Petrokimia Gresik.

#### 4.3 Distribusi Waktu antar Kerusakan

*Fitting* data waktu antar kerusakan dilakukan untuk mengetahui jenis distribusi data waktu antar kerusakan peralatan. Data *Time to Failure* (TTF) didapatkan dari data historis unit Pabrik Phonska IV tahun 2017 – 2019 dan OREDA *handbook*. *Fitting* distribusi data *Time to Failure* dilakukan dengan menggunakan *software* Weibull++ 6 dengan memasukkan data TTF yang telah direkap untuk setiap peralatan. *Fitting* distribusi data TTF dengan menggunakan *software* Weibull++ 6 dilakukan dengan menggunakan metode *rank regression estimation*. Langkah pertama yang dilakukan dalam proses *fitting* yaitu mencari nilai *average goodness of fit* (AVGOF), *average plot* (AVPLOT), dan *likelihood value* (LKV). *Average goodness of fit* memberikan nilai yang mendeskripsikan kecocokan data dengan distribusi teoritis. Semakin besar nilai *average goodness of fit* mengindikasikan bahwa *fitting* semakin buruk. *Average plot* memberikan nilai yang menggambarkan seberapa baik nilai yang diplot sesuai. Semakin kecil nilai *average plot* maka *fitting* semakin baik. Pada *likelihood value*, nilai *likelihood* yang semakin besar menggambarkan hasil *fitting* yang semakin baik. Nilai *average decision weight ranking* (DESV) didapatkan dengan melakukan *ranking* berdasarkan AVGOF, AVPLOT, dan LKV untuk setiap distribusi. Distribusi yang memiliki nilai DESV terkecil dianggap sebagai distribusi terbaik. Tabel 4.2 merupakan rekap distribusi data *Time to Failure* dan parameternya.

Tabel 4.2 Rekap Distribusi dan Parameter dari Peralatan Pabrik Phonska IV

Kode	Peralatan	Distribusi	$\beta$	$\eta$	$\gamma$	$\lambda$	Sumber Data
B-26M366	Pre Neutralizer Reactor Agitator	<i>Exponential</i>				$3,90 \times 10^{-5}$	Data Historis Perusahaan
B-26P303A/B	Slurry Pump	<i>Exponential</i>				$5,19 \times 10^{-6}$	OREDA
B-26M215	Raw Material Bucket Elevator	<i>Weibull 3</i>	1,013	5855,4	91,8322		Data Historis Perusahaan
B-26M216	Raw Material Conveyor	<i>Exponential</i>				$1,80 \times 10^{-5}$	Data Historis Perusahaan
B-22M305	Recycle Bucket Elevator	<i>Weibull 3</i>	0,8347	1767,5126	214,0531		Data Historis Perusahaan
B-22M304	Recycle Drag Flight Conveyor	<i>Exponential</i>				$1,80 \times 10^{-5}$	Data Historis Perusahaan
B-26P312A/B	Granulator Pre Scrubber Pump	<i>Exponential</i>				$26,46 \times 10^{-6}$	OREDA
B-22P302A/B	Venturi Scrubber Pump	<i>Exponential</i>				$26,46 \times 10^{-6}$	OREDA
B-22P301A/B	Scrubber Pump	<i>Exponential</i>				$26,46 \times 10^{-6}$	OREDA
B-22P305A/B	Tower Scrubber Pump	<i>Exponential</i>				$26,46 \times 10^{-6}$	OREDA
B-22P309	Sump pump	<i>Exponential</i>				$16,20 \times 10^{-6}$	OREDA
B-22M361	Granulator	<i>Exponential</i>				$1,200 \times 10^{-5}$	Data Historis Perusahaan
B-26C302	Dryer Fan	<i>Exponential</i>				$98,21 \times 10^{-6}$	OREDA
B-26P313A/B/C/D	Tail Gas Scrubber Pump	<i>Exponential</i>				$26,46 \times 10^{-6}$	OREDA
B-22C307	Combustion Air Fan	<i>Exponential</i>				$98,21 \times 10^{-6}$	OREDA
B-22Q303	Coal Crusher	<i>Weibull 2</i>	1,0003	7154,93			Data Historis Perusahaan
B-22M365	Coal Bucket Elevator	<i>Exponential</i>				0,00002	Data Historis Perusahaan

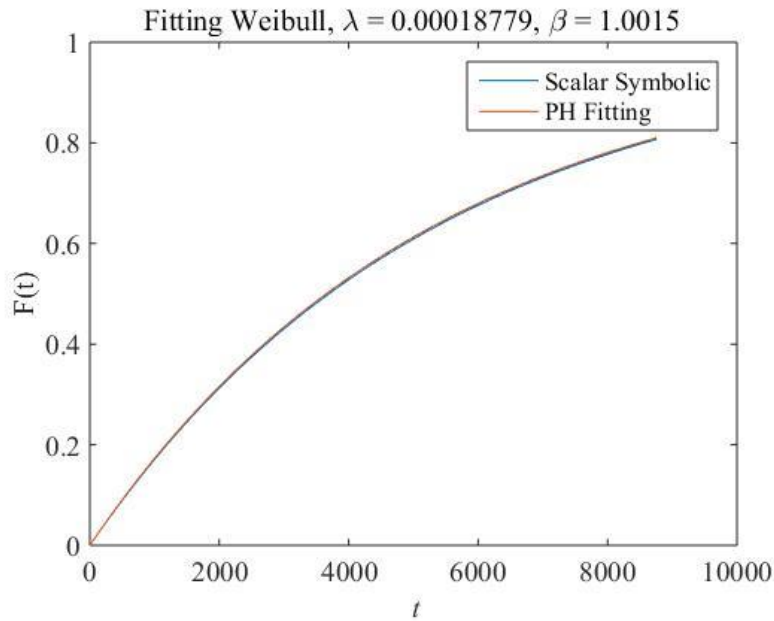
Tabel 4.2 Rekap Distribusi dan Parameter dari Peralatan Pabrik Phonska IV (Lanjutan)

Kode	Peralatan	Distribusi	$\beta$	$\eta$	$\gamma$	$\lambda$	Sumber Data
B-22M366	Coal Dish Feeder	<i>Exponential</i>				0,00003	Data Historis Perusahaan
B-22C304	Cooler Fan	<i>Exponential</i>				$98,21 \times 10^{-6}$	OREDA
B-22M362	Dryer	<i>Weibull 2</i>	1,0015	5325,22			Data Historis Perusahaan
B-22M328A/B	Screen Feed Drag Conveyor	<i>Exponential</i>				0,00003	Data Historis Perusahaan
B-22F301A/B/C/D	Product Screen	<i>Exponential</i>				$4,1 \times 10^{-5}$	Data Historis Perusahaan
B-22Q301A/B/C/D	Oversize Crusher	<i>Exponential</i>				$3,5 \times 10^{-5}$	Data Historis Perusahaan
B-22M303	Screen Product Conveyor	<i>Weibull 3</i>	1,0873	2307,1531	423,28		Data Historis Perusahaan
B-26P318	Coating Oil Feeding Pump	<i>Exponential</i>				$649,0 \times 10^{-6}$	OREDA
B-26P317A/B	Coating Oil Injection Pump	<i>Exponential</i>				$12,12 \times 10^{-6}$	OREDA
B-26M310	Conveyor Recycle Regranulator	<i>Weibull 2</i>	1,2729	3954,6141			Data Historis Perusahaan
B-22M363	Cooler	<i>Weibull 2</i>	1,0029	4696,39			Data Historis Perusahaan
B-22M308	Product Elevator	<i>Exponential</i>				0,00002	Data Historis Perusahaan
B-22M368	Coating Powder Feeder	<i>Exponential</i>				$2,4 \times 10^{-5}$	Data Historis Perusahaan
B-26M364	Coater	<i>Weibull 2</i>	1,01	5234,87			Data Historis Perusahaan
B-22M340	Product Conveyor	<i>Weibull 2</i>	0,8052	3921,6987			Data Historis Perusahaan

*Fitting* distribusi pada Tabel 4.2 dilakukan pada peralatan yang memiliki sumber data TTF dari data historis. Sementara itu untuk peralatan yang memiliki sumber data TTF dari OREDA *handbook*, distribusi data yang digunakan adalah distribusi eksponensial. Kejadian *failure* yang ada pada *database* OREDA didapatkan dari fase *useful life* dengan *failure rate* konstan. Seluruh estimasi *failure rate* yang ada pada OREDA *handbook* memiliki asumsi *constant failure rate*.

Tahap selanjutnya yaitu *fitting* data TTF ke distribusi *phase-type*. *Fitting* data TTF ke distribusi *phase-type* dilakukan dengan menggunakan metode *trace-based fitting* yaitu dengan melakukan *trace* data sehingga data dapat direpresentasikan dalam bentuk distribusi *phase-type* yang memiliki properti statistik menyerupai distribusi teoritisnya yang telah didapatkan pada proses *fitting* sebelumnya. *Fitting* data TTF ke distribusi *phase-type* dilakukan dengan menggunakan *software* BuTools pada Matlab. Nilai CVTTF digunakan untuk menentukan jenis distribusi *phase-type* dan kategori *failure rate* seperti yang telah dijelaskan pada Tabel 2.1. Dari proses *fitting* yang dilakukan didapatkan parameter distribusi *phase-type*, nilai *coefficient of variation time to failure* (CVTTF) dan *mean time to failure* (MTTF). *Input* yang digunakan dalam proses *fitting* ke distribusi *phase-type* yaitu parameter distribusi data TTF pada Tabel 4.2 yang telah didapatkan pada proses *fitting* dengan menggunakan *software* Weibull++ 6.

Proses *fitting* dilakukan dengan mengubah nilai  $n$  matriks hingga distribusi *phase-type* mendekati distribusi teoritisnya. Semakin besar  $n$  matriks maka distribusi *phase-type* semakin mendekati distribusi teoritis aslinya. Validasi hasil *fitting* distribusi *phase-type* dilakukan dengan membandingkan grafik *cumulative distribution function* (CDF), nilai CVTTF, dan nilai MTTF antara distribusi teoritis dengan distribusi *phase-type*. Validasi dilakukan untuk mengetahui apakah representasi matriks distribusi *phase-type* mewakili fungsi kerusakan peralatan tersebut. Proses *fitting* dilakukan hingga distribusi *phase-type* telah memiliki grafik fungsi distribusi, nilai MTTF, dan nilai CVTTF yang mendekati distribusi aslinya. Gambar 4.3 merupakan contoh hasil *fitting* data ke distribusi *phase-type* pada peralatan *dryer* B22M362. Rekapitulasi hasil *fitting* data TTF ke distribusi *phase-type* untuk peralatan lainnya dapat dilihat pada Lampiran 1.



Gambar 4.3 Grafik CDF Hasil *Fitting* Distribusi *Weibull* Peralatan B22M362 ke Distribusi *Phase-Type*

- Parameter distribusi *phase-type* peralatan B22M362.

$$n = 3$$

$$\mathbf{a} = [0,9596 \quad 0,0404 \quad 0]$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -0,0001888 & 0 & 0 \\ 0 & -0,0002171 & 0,0002171 \\ 0 & 0 & -0,0002171 \end{bmatrix}$$

- Fungsi keandalan peralatan B22M362 berdasarkan Persamaan (59).

$$R(t) = [0,9596 \quad 0,0404 \quad 0] e^{\begin{bmatrix} -0,0001888 & 0 & 0 \\ 0 & -0,0002171 & 0,0002171 \\ 0 & 0 & -0,0002171 \end{bmatrix} t} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

- Fungsi *hazard* peralatan B22M362 berdasarkan Persamaan (60).

$$h(t) = - [0,9596 \quad 0,0404 \quad 0] e^{\begin{bmatrix} -0,0001888 & 0 & 0 \\ 0 & -0,0002171 & 0,0002171 \\ 0 & 0 & -0,0002171 \end{bmatrix} t} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}^{-1}$$

- MTTF peralatan B22M362 berdasarkan Persamaan (61).

$$MTTF = -[0,9596 \quad 0,0404 \quad 0] \times 10^{-3} \begin{bmatrix} -0,1888 & 0 & 0 \\ 0 & -0,2171 & 0,2171 \\ 0 & 0 & -0,2171 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Tabel 4.3 Nilai CVTTF dan MTTF Distribusi *Weibull* dan Distribusi *Phase-Type* Peralatan B22M362

Distribusi	MTTF	CVTTF	Kategori
<i>Weibull</i>	5321,9	0,9985	IFR
<i>Phase-Type</i>	5324,8	0,9981	

#### 4.4 Perhitungan Keandalan Sistem

Pada subbab ini akan dilakukan perhitungan keandalan sistem Pabrik Phonska IV. Perhitungan keandalan sistem dilakukan dengan menggunakan metode skalar dan metode pendekatan distribusi *phase-type* untuk waktu 1 tahun atau 8760 jam. Perhitungan keandalan sistem dilakukan berdasarkan struktur *reliability block diagram* pada Subbab 4.2.

Perhitungan keandalan sistem metode skalar dilakukan dengan menghitung nilai keandalan peralatan disesuaikan dengan jenis distribusi masing-masing peralatan. Nilai keandalan sistem digunakan untuk menghitung nilai keandalan subsistem dan keandalan sistem berdasarkan susunan peralatan pada subsistem dan sistem. Tabel 4.4 merupakan hasil perhitungan keandalan sistem dengan metode skalar.

Tabel 4.4 Hasil Perhitungan Nilai Keandalan Sistem Metode Skalar

Kode	Peralatan	$R_{peralatan}$ (8760)	$R_{subsistem}$ (8760)	$R_{sistem}$ (8760)
<i>Subsistem Pre Neutralizer</i>				$1,011 \times 10^{-5}$
B-26M366	Pre Neutralizer Reactor Agitator	0,7106	0,7092	
B-26P303A	Slurry Pump	0,9598		
B-26P303B	Slurry Pump	0,9556		

Tabel 4.4 Hasil Perhitungan Nilai Keandalan Sistem Metode Skalar (Lanjutan)

Kode	Peralatan	$R_{peralatan}$ (8760)	$R_{subsistem}$ (8760)	$R_{sistem}$ (8760)	
<i>Subsistem Solid Raw Material</i>					
B-26M215	Raw Material Bucket Elevator	0,6802	0,3174		
B-26M216	Raw Material Conveyor	0,8541			
B-22M305	Recycle Bucket Elevator	0,6453			
B-22M304	Recycle Drag Flight Conveyor	0,8467			
<i>Subsistem Reaction Scrubbing &amp; Granulation</i>					
B-26P312A	Granulator Pre Scrubber Pump	0,9170	0,5846		
B-26P312B	Granulator Pre Scrubber Pump	0,9170			
B-22P302A	Venturi Scrubber Pump	0,9170			
B-22P302B	Venturi Scrubber Pump	0,9170			
B-22P301A	Scrubber Pump	0,9170			
B-22P301B	Scrubber Pump	0,9170			
B-22P305A	Tower Scrubber Pump	0,9170			
B-22P305B	Tower Scrubber Pump	0,9170			
B-22P309	Sump pump	0,8683			
B-22M361	Granulator	0,6922			
<i>Subsistem Tail Gas Scrubber</i>					
B-26C302	Dryer Fan	0,9862	0,9726		
B-26P313A	Tail Gas Scrubber Pump	0,9170			
B-26P313B	Tail Gas Scrubber Pump	0,9170			
B-26P313C	Tail Gas Scrubber Pump	0,9170			
B-26P313D	Tail Gas Scrubber Pump	0,9170			
<i>Subsistem Coal Burner</i>					
B-22C307	Combustion Air Fan	0,9862	0,0443		
B-22Q303	Coal Crusher	0,2939			
B-22M365	Coal Bucket Elevator	0,8393			
B-22M366A	Coal Dish Feeder	0,7689			
B-22C304A	Cooler Fan	0,9862			
B-22C304B	Cooler Fan	0,9862			
B-22M362	Dryer	0,1928			



Tabel 4.4 Hasil Perhitungan Nilai Keandalan Sistem Metode Skalar (Lanjutan)

Kode	Peralatan	$R_{peralatan}$ (8760)	$R_{subsistem}$ (8760)	$R_{sistem}$ (8760)
<i>Subsistem Recycle Loop &amp; Furnace</i>				
B-22M328A	Screen Feed Drag Conveyor	0,7689	0,2070	
B-22M328B	Screen Feed Drag Conveyor	0,7689		
B-22F301A	Product Screen	0,6983		
B-22F301B	Product Screen	0,6983		
B-22F301C	Product Screen	0,6983		
B-22F301D	Product Screen	0,6983		
B-22Q301A	Oversize Crusher	0,7359		
B-22Q301B	Oversize Crusher	0,7359		
B-22Q301C	Oversize Crusher	0,7359		
B-22Q301D	Oversize Crusher	0,7359		
B-22M303	Screen Product Conveyor	0,7555		
<i>Subsistem Coating Oil</i>				
B-26P318	Coating Oil Feeding Pump	0,6169	0,6106	
B-26P317A	Coating Oil Injection Pump	0,8993		
B-26P317B	Coating Oil Injection Pump	0,8993		
<i>Subsistem Final Product</i>				
B-26M310	Conveyor Recycle Regranulator	0,8692	0,0141	
B-22M363	Cooler	0,1543		
B-22M308	Product Elevator	0,8393		
B-22M368	Coating Powder Feeder	0,8104		
B-26M364	Coater	0,1860		
B-22M340	Product Conveyor	0,8320		

Perhitungan keandalan sistem dengan menggunakan pendekatan distribusi *phase-type* dilakukan dengan menggunakan bantuan *software* Matlab untuk melakukan operasi *Kronecker*. Fungsi keandalan sistem didapatkan dari fungsi keandalan subsistem dan fungsi keandalan subsistem didapatkan dari fungsi

keandalan peralatan dengan menggunakan *closure properties* distribusi *phase-type*. Dari fungsi keandalan peralatan, fungsi keandalan subsistem, dan fungsi keandalan sistem maka didapatkan nilai keandalan sistem. Tabel 4.5 merupakan contoh hasil perhitungan untuk mendapatkan parameter distribusi *phase-type* subsistem *solid raw material* dari distribusi *phase-type* peralatan penyusunnya. *Closure properties* yang digunakan adalah *closure properties* untuk sistem seri pada Persamaan (69) hingga Persamaan (71). Hasil perhitungan parameter distribusi *phase-type* untuk subsistem dapat digunakan untuk mendapatkan fungsi keandalan, fungsi *hazard*, dan *mean time to failure* subsistem yang berdistribusi *phase-type*.

Tabel 4.5 Hasil Perhitungan *Closure Properties* Sistem Seri

Peralatan	Parameter Distribusi <i>Phase-Type</i>		
	$n$	$\mathbf{a}$	$\mathbf{A}$
B-26M215	2	[0,7133 0,2867]	$\begin{bmatrix} -0,0004 & 0 \\ 0 & -0,0027 \end{bmatrix}$
B-26M216	1	[1]	[-0,0004]
B-22M305	2	[0,8155 0,1885]	$\begin{bmatrix} -0,0004 & 0 \\ 0 & -0,0029 \end{bmatrix}$
B-22M304	1	[1]	[-0,0004]
<b>Subsistem <i>Solid Raw Material</i></b>			
$n = 4$			
$\mathbf{a} = [0,5788 \quad 0,1345 \quad 0,2327 \quad 0,054]$			
$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -0,0016 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0,0041 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0,0039 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0,0064 \end{bmatrix}$			

- Fungsi keandalan subsistem *solid raw material* berdasarkan Persamaan (59).

$$R(t) = [0,5788 \quad 0,1345 \quad 0,2327 \quad 0,054] e^{\begin{bmatrix} -0,0016 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0,0041 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0,0039 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0,0064 \end{bmatrix} t} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

- Fungsi *hazard* subsistem *solid raw material* berdasarkan Persamaan (60).

$$h(t) = - [0,5788 \quad 0,1345 \quad 0,2327 \quad 0,054] e^{\begin{bmatrix} -0,0016 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0,0041 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0,0039 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0,0064 \end{bmatrix} t} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\left( [0,5788 \quad 0,1345 \quad 0,2327 \quad 0,054] e^{\begin{bmatrix} -0,0016 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0,0041 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0,0039 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0,0064 \end{bmatrix} t} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \right)^{-1}$$

- MTTF subsistem *solid raw material* berdasarkan Persamaan (61).

$$MTTF = \frac{-[0,5788 \quad 0,1345 \quad 0,2327 \quad 0,054]}{\begin{bmatrix} -0,0016 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0,0041 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0,0039 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0,0064 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}}$$

Tabel 4.6 merupakan hasil perhitungan nilai keandalan sistem pada  $t = 8760$ . Hasil perhitungan keandalan sistem dengan menggunakan pendekatan distribusi *phase-type* dibandingkan dengan hasil perhitungan keandalan sistem dengan metode skalar konvensional untuk dilakukan validasi.

Tabel 4.6 Hasil Perhitungan Nilai Keandalan Sistem Metode Pendekatan Distribusi *Phase-Type*

Subsistem	$R_{subsistem}(8760)$	$R_{sistem}(8760)$
<i>Pre Neutralizer</i>	0,7092	$1,011 \times 10^{-5}$
<i>Solid Raw Material</i>	0,3174	
<i>Reaction Scrubbing &amp; Granulation</i>	0,5846	
<i>Tail Gas Scrubber</i>	0,9726	
<i>Coal Burner</i>	0,0443	
<i>Recycle Loop &amp; Furnace</i>	0,2070	
<i>Coating Oil</i>	0,6106	
<i>Final Product</i>	0,0141	

Tabel 4.7 Rekap Hasil Perhitungan Nilai Keandalan Sistem dan *Hazard* Sistem

$t$	$R_{sistem}(t)$	$h_{sistem}(t)$
0	1	0,0009
438	0,5844	0,0012
876	0,3392	0,0017
1314	0,1957	0,0020
1752	0,1123	0,0023
2190	0,0641	0,0026
2628	0,0364	0,0030
3066	0,0206	0,0033
3504	0,0116	0,0036
3942	0,0065	0,0039
4380	0,0037	0,0042
4818	0,0020	0,0046
5256	0,0011	0,0049
5694	0,0006	0,0052
6132	0,0003	0,0055
6570	0,0002	0,0058
7008	0,0001	0,0061
7446	0,0001	0,0065
7884	3,18,E-05	0,0068
8322	1,74,E-05	0,0071
8760	1,01,E-05	0,0074

Pengukuran yang digunakan dalam analisis keandalan sistem yaitu *mean time to failure*. Tabel 4.8 merupakan hasil perhitungan nilai *mean time to failure* sistem dengan menggunakan metode skalar konvensional dan metode pendekatan distribusi *phase-type*.

Tabel 4.8 MTTF dan CVTTF Sistem Eksisting

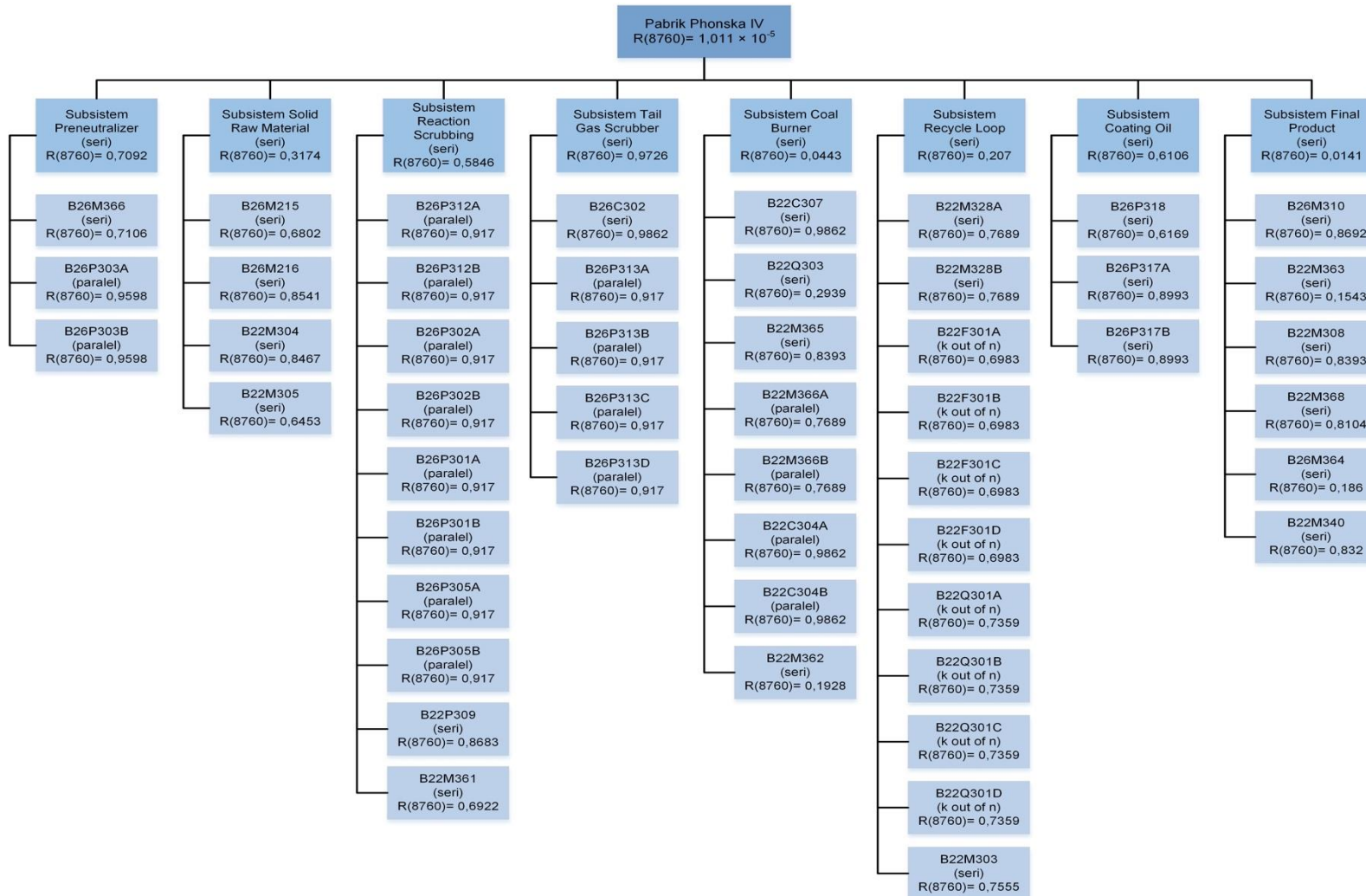
Subsistem	MTTF (Jam)		CVTTF	
	Skalar	Matriks	Skalar	Matriks
<i>Pre Neutralizer</i>	25008	25008	0,9817	0,9817
<i>Solid Raw Material</i>	7633,6	7633,6	1	1
<i>Reaction Scrubbing &amp; Granulation</i>	15112	15112	0,9198	0,9198
<i>Tail Gas Scrubber</i>	83521	83521	0,712	0,712
<i>Coal Burner</i>	2786,3	2786,3	0,988	0,988
<i>Recycle Loop &amp; Furnace</i>	5683,5	5683,5	0,7944	0,7944

Tabel 4.8 MTTF dan CVTTF Sistem Eksisting (Lanjutan)

Subsistem	MTTF (Jam)		CVTTF	
	Skalar	Matriks	Skalar	Matriks
<i>Coating Oil</i>	17137	17137	0,9643	0,9643
<i>Final Product</i>	1794,7	1794,7	0,998	0,998
<b>Sistem</b>	<b>714,53</b>	<b>714,53</b>	<b>0,9198</b>	<b>0,9198</b>

#### 4.5 Penentuan Subsistem Kritis

Pada subbab ini akan dilakukan perhitungan *reliability importance* untuk menentukan peralatan kritis dengan *Birnbaum importance index*. *Birnbaum importance index* mempertimbangkan faktor keandalan komponen, struktur sistem, dan waktu. Gambar 4.6 merupakan hierarki keandalan sistem berdasarkan *breakdown* sistem yang dilakukan untuk analisis keandalan. Berdasarkan hierarki keandalan sistem pada Gambar 4.6 nilai keandalan sistem ditentukan oleh nilai keandalan subsistem dan nilai keandalan subsistem ditentukan oleh nilai keandalan peralatan. Oleh sebab itu peningkatan keandalan sistem akan dilakukan melalui peningkatan keandalan subsistem sehingga perhitungan *Birnbaum importance index* dilakukan pada subsistem terlebih dahulu. Hasil dari perhitungan *importance index* yang dilakukan akan digunakan untuk menentukan subsistem kritis yang akan dilakukan perbaikan untuk meningkatkan keandalan sistem. Peningkatan keandalan subsistem kritis dilakukan melalui peningkatan keandalan peralatan kritis di subsistem kritis.



Gambar 4.4 Hierarki Keandalan Sistem

Perhitungan *Birnbaum importance index* dilakukan dengan menggunakan Persamaan (30) sehingga didapatkan nilai *importance index* setiap subsistem pada Tabel 4.9.

Tabel 4.9 Hasil Perhitungan *Birnbaum's Importance Index* Subsistem

Subsistem	$R_{subsistem}(8760)$	<i>Birnbaum's Importance Index</i>
<i>Pre Neutralizer</i>	0,7092	$1,43 \times 10^{-5}$
<i>Solid Raw Material</i>	0,3174	$3,19 \times 10^{-5}$
<i>Reaction Scrubbing &amp; Granulation</i>	0,5846	$1,73 \times 10^{-5}$
<i>Tail Gas Scrubber</i>	0,9726	$1,04 \times 10^{-5}$
<i>Coal Burner</i>	0,0443	$2,28 \times 10^{-4}$
<i>Recycle Loop &amp; Furnace</i>	0,2070	$4,89 \times 10^{-5}$
<i>Coating Oil</i>	0,6106	$1,66 \times 10^{-5}$
<i>Final Product</i>	0,0141	$7,17 \times 10^{-4}$

Berdasarkan hasil perhitungan pada Tabel 4.9 subsistem kritis yang akan dipilih untuk perbaikan sistem yaitu subsistem *coal burner* dan subsistem *final product*. Peningkatan keandalan sistem akan dilakukan pada peralatan kritis di pada masing-masing subsistem tersebut. Tabel 4.10 merupakan *Birnbaum's importance index* untuk peralatan di subsistem *coal burner* dan subsistem *final product*. Berdasarkan hasil perhitungan pada Tabel 4.10 peningkatan keandalan sistem akan dilakukan pada peralatan *coal crusher* dan *dryer* di subsistem *coal burner* serta peralatan *cooler* dan *coater* di subsistem *final product*.

Tabel 4.10 Hasil Perhitungan *Birnbaum's Importance Index* Peralatan

Kode	Peralatan	$R_{peralatan}(8760)$	<i>Birnbaum's Importance Index</i>
<i>Subsistem Coal Burner</i>			
B-22C307	Combustion Air Fan	0,9862	0,0450
B-22Q303	Coal Crusher	0,2939	0,1510
B-22M365	Coal Bucket Elevator	0,8393	0,0529
B-22M366A	Coal Dish Feeder	0,7689	0,0108
B-22M366B	Coal Dish Feeder	0,7689	0,0108
B-22C304A	Cooler Fan	0,9862	0,0006

Tabel 4.10 Hasil Perhitungan *Birnbaum's Importance Index* Peralatan (Lanjutan)

<b>Kode</b>	<b>Peralatan</b>	$R_{peralatan}(8760)$	<b><i>Birnbaum's Importance Index</i></b>
B-22C304B	Cooler Fan	0,9862	0,0006
B-22M362	Dryer	0,1928	0,2302
<i>Subsistem Final Product</i>			
B-26M310	Conveyor Recycle Regranulator	0,8692	0,0162
B-22M363	Cooler	0,1543	0,0915
B-22M308	Product Elevator	0,8393	0,0168
B-22M368	Coating Powder Feeder	0,8104	0,0174
B-26M364	Coater	0,186	0,0759
B-22M340	Product Conveyor	0,832	0,0170



## **BAB 5**

### **ANALISIS SISTEM EKSISTING DAN USULAN PERBAIKAN SISTEM**

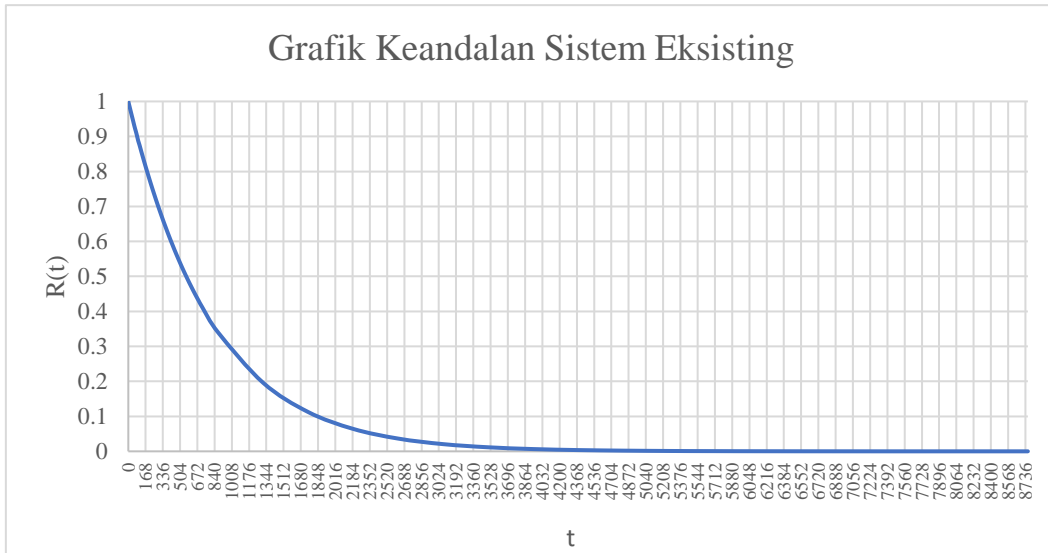
Pada bab ini dilakukan analisis terhadap hasil pengolahan data yang telah dilakukan pada bab sebelumnya. Analisis yang dilakukan meliputi analisis keandalan sistem eksisting, analisis sensitivitas, dan analisis skenario perbaikan.

#### **5.1 Analisis Keandalan Sistem Eksisting**

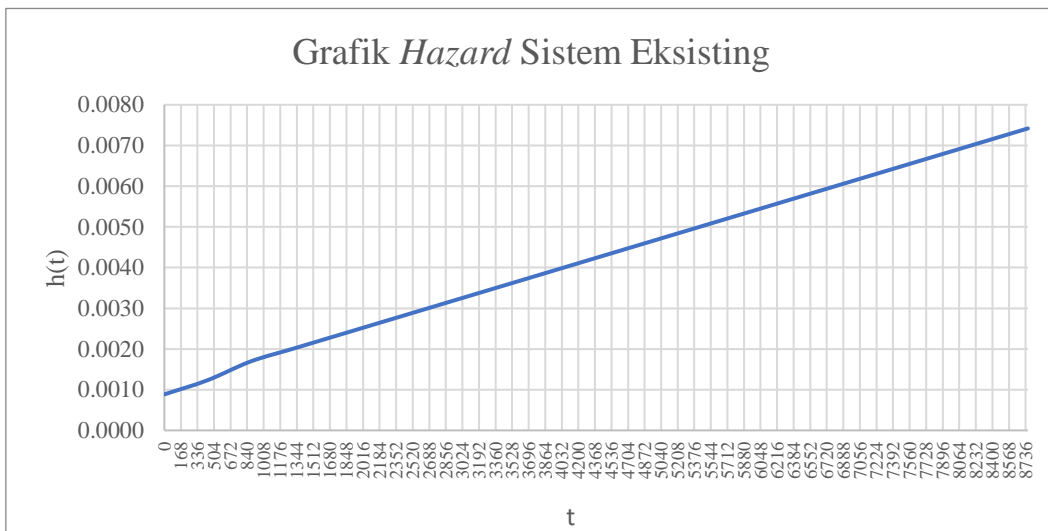
Perhitungan keandalan sistem dilakukan dengan menggunakan metode skalar konvensional dan metode pendekatan distribusi *phase-type*. Perhitungan keandalan sistem dengan metode konvensional dilakukan dengan berbasis nilai keandalan peralatan yang disesuaikan dengan distribusi kerusakan masing-masing peralatan. Sementara itu perhitungan keandalan sistem dengan menggunakan metode pendekatan distribusi *phase-type* dilakukan dengan berbasis fungsi keandalan. Hasil perhitungan keandalan sistem dengan kedua metode tersebut memberikan nilai keandalan pada  $t = 8760$  jam yang sama yaitu  $1,011 \times 10^{-5}$ . Hal tersebut disebabkan oleh kemampuan distribusi *phase-type* dalam merepresentasikan berbagai distribusi kerusakan sehingga hasil perhitungan yang dilakukan sama dengan hasil perhitungan konvensional. Distribusi *phase-type* memiliki *closure properties* sehingga operasi pada distribusi *phase-type* akan mengarah lagi ke distribusi *phase-type*. Fungsi keandalan peralatan dapat digunakan sebagai *input* untuk mendapatkan fungsi keandalan subsistem dan sistem dengan menggunakan *closure properties*. Fungsi keandalan direpresentasikan dalam bentuk distribusi *phase-type* berbasis matriks. Namun perhitungan keandalan sistem dengan menggunakan distribusi *phase-type* berbasis matriks memiliki kekurangan dalam hal dimensi matriks yang semakin besar seiring dengan besarnya orde matriks dan banyaknya jumlah peralatan. Perhitungan keandalan sistem dengan dimensi matriks yang besar membutuhkan waktu komputasi yang lama dan *memory* komputer yang besar.

Pengukuran keandalan sistem selama 1 tahun dilakukan untuk memberi informasi mengenai tingkat keandalan sistem selama 1 tahun sehingga dapat

diketahui probabilitas sistem beroperasi tanpa kegagalan. Gambar 5.1 dan Gambar 5.2 merupakan grafik keandalan sistem dan grafik *hazard* sistem pada sistem eksisting.



Gambar 5.1 Grafik Keandalan Sistem Eksisting



Gambar 5.2 Grafik *Hazard* Sistem Eksisting

Pola penurunan keandalan sistem ditunjukkan melalui grafik keandalan sistem pada Gambar 5.1. Hasil perhitungan nilai keandalan sistem eksisting pada  $t = 8760$  jam berdasarkan Tabel 4.6 memiliki nilai yang sangat rendah. Hal tersebut disebabkan oleh laju kegagalan yang tinggi dan struktur sistem yang memiliki banyak peralatan yang terhubung secara seri. Grafik *hazard* sistem pada

Gambar 5.2 menunjukkan *behavior* dari proses kegagalan yang terjadi pada sistem. Berdasarkan Gambar 5.2 sistem memiliki *behavior* laju kegagalan yaitu *increasing failure rate* (IFR). *Increasing failure rate* banyak terjadi pada peralatan mekanik yang disebabkan oleh penuaan peralatan akibat faktor fisika, kimia, dan lingkungan seperti *wearout*, korosi, dan *fatigue*.

Fungsi keandalan yang berdistribusi *phase-type* dapat digunakan untuk menemukan momen statistik tanpa proses integrasi. Momen yang digunakan sebagai ukuran dalam analisis keandalan yaitu momen pertama berupa *mean time to failure*. *Mean time to failure* menunjukkan rata-rata lama waktu sistem dapat beroperasi sebelum terjadinya kegagalan. Berdasarkan Tabel 4.8 didapatkan nilai *mean time to failure* sistem yaitu 714,53 jam atau 29,77 hari. Nilai *mean time to failure* sistem dapat digunakan untuk menentukan *interval* pemeliharaan dan melakukan perhitungan *availability* sistem. Sistem memiliki *mean time to repair* atau *mean time to replace* deterministik selama 5 hari. Tabel 5.1 merupakan hasil perhitungan *availability* sistem dan *stream days* sistem kondisi eksisting.

Tabel 5.1 Hasil Perhitungan *Stream Days* Sistem Eksisting

MTTF (Hari)	MTTR (Hari)	Availability	Stream Days
29,77	5	0,856	312,51

## 5.2 Analisis Sensitivitas

Analisis sensitivitas dilakukan untuk mencari faktor-faktor yang mempengaruhi keandalan sistem sehingga dapat digunakan untuk mencari solusi bagaimana meningkatkan keandalan sistem. Faktor yang dianalisis yaitu perubahan struktur sistem dengan menerapkan redundansi secara paralel dan *standby perfect* serta penggantian peralatan. Analisis sensitivitas pada subbab ini dilakukan dengan hanya mempertimbangkan aspek matematis untuk melihat seberapa sensitif pengaruh sistem redundansi dan penggantian peralatan terhadap keandalan sistem. Berdasarkan grafik keandalan sistem eksisting pada Gambar 5.1 *behavior* penurunan keandalan sistem dapat terlihat hingga  $t = 3864$  jam. Peningkatan keandalan sistem akan dilakukan pada  $t = 720$  jam untuk melihat keandalan sistem selama 1 bulan beroperasi. Tabel 5.2 merupakan nilai keandalan sistem eksisting

pada  $t = 0$  jam hingga  $t = 720$  jam. Berdasarkan Tabel 5.2 nilai keandalan sistem pada  $t = 720$  jam yaitu 0,412. Pembatasan waktu tersebut disesuaikan dengan *behavior* penurunan keandalan sistem dan *mean time to failure* sistem agar upaya yang dilakukan untuk meningkatkan keandalan sistem dapat terlihat.

Tabel 5.2 Nilai Keandalan Sistem Eksisting dan *Hazard* Sistem  $t = 0$  Hingga  $t = 720$

$t$	$R_{sistem}(t)$	$h_{sistem}(t)$
0	1	0,0009
36	0,9571	0,0009
72	0,9159	0,0010
108	0,8765	0,0010
144	0,8388	0,0010
180	0,8026	0,0011
216	0,7679	0,0011
252	0,7348	0,0011
288	0,7030	0,0011
324	0,6725	0,0012
360	0,6434	0,0012
396	0,6155	0,0012
432	0,5887	0,0013
468	0,5631	0,0013
504	0,5386	0,0013
540	0,5152	0,0014
576	0,4927	0,0014
612	0,4712	0,0014
648	0,4506	0,0015
684	0,4309	0,0015
720	0,4120	0,0015

### 5.2.1 Pengaruh Struktur Paralel

Penambahan peralatan *redundant* dengan struktur paralel merupakan salah satu cara untuk meningkatkan keandalan sistem. Tabel 5.3 merupakan nilai keandalan sistem pada  $t = 720$  jam dengan melakukan penambahan peralatan *redundant* sebanyak 1 hingga 4 buah dengan struktur paralel pada peralatan *coal crusher*. Berdasarkan Tabel 5.3 semakin banyak jumlah peralatan yang ditambahkan maka nilai keandalan sistem semakin meningkat.

Tabel 5.3 Hasil Analisis Sensitivitas Pengaruh Struktur Paralel

Jumlah Penambahan Peralatan	$R_{subsystem}(720)$	$R_{sistem}(720)$
1	0,8589	0,4568
2	0,8634	0,4592
3	0,8636	0,4593
4	0,8637	0,4594

### 5.2.2 Pengaruh Struktur Standby Perfect Switch

Penambahan peralatan *redundant* dengan struktur *cold standby* merupakan salah satu cara untuk meningkatkan keandalan sistem. Tabel 5.4 merupakan nilai keandalan sistem pada  $t = 720$  jam dengan melakukan penambahan peralatan *redundant* dengan struktur *cold standby* dengan *perfect switch* pada peralatan *coal crusher*. Berdasarkan Tabel 5.4 penambahan 1 hingga 3 peralatan meningkatkan keandalan sistem. Namun pada jumlah penambahan peralatan selanjutnya tidak memberikan pengaruh terhadap peningkatan keandalan sistem.

Tabel 5.4 Hasil Analisis Sensitivitas Pengaruh Struktur Standby Perfect Switch

Jumlah Penambahan Peralatan	$R_{subsystem}(720)$	$R_{sistem}(720)$
1	0,8712	0,4633
2	0,8736	0,4646
3	0,8737	0,4647
4	0,8737	0,4647
5	0,8737	0,4647

### 5.2.3 Pengaruh Penggantian Peralatan

Penggantian peralatan dengan nilai keandalan yang lebih tinggi memberikan pengaruh terhadap peningkatan keandalan sistem. Tabel 5.5 merupakan contoh penggantian peralatan *dryer* dengan beberapa nilai keandalan dan nilai keandalan sistem yang didapatkan. Berdasarkan Tabel 5.5 nilai keandalan sistem mengalami peningkatan dengan meningkatnya nilai keandalan peralatan.

Tabel 5.5 Hasil Analisis Sensitivitas Pengaruh Penggantian Peralatan

$R_{peralatan}(720)$	$R_{subsystem}(720)$	$R_{sistem}(720)$
0,8705	0,7748	0,4120

Tabel 5.5 Hasil Analisis Sensitivitas Pengaruh Penggantian Peralatan (Lanjutan)

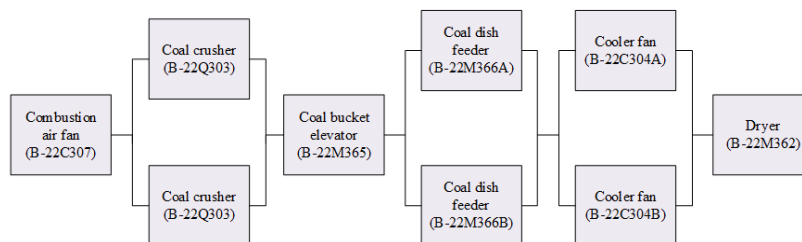
$R_{peralatan}(720)$	$R_{subsistem}(720)$	$R_{sistem}(720)$
0,8905	0,7925	0,4215
0,9105	0,8103	0,4310
0,9305	0,8281	0,4404
0,9505	0,8459	0,4499

### 5.3 Rancangan dan Analisis Skenario Perbaikan

Perancangan skenario perbaikan dilakukan pada peralatan kritis di subsistem kritis yang telah ditentukan melalui *Birnbaum's importance index* pada Subbab 4.5. Subsistem kritis yaitu subsistem *coal burner* dengan peralatan kritis yaitu *coal crusher* dan *dryer* dan subsistem *final product* dengan peralatan kritis yaitu *cooler* dan *coater*. Perancangan skenario perbaikan dilakukan untuk meningkatkan keandalan sistem pada  $t = 720$  jam. Skenario perbaikan didasarkan pada hasil analisis sensitivitas yang telah dilakukan dan dengan mempertimbangkan aspek *practical* untuk perbaikan sistem. Terdapat lima skenario perbaikan yang diusulkan yaitu penambahan peralatan *redundant* dengan struktur paralel, penambahan peralatan *redundant* dengan struktur *cold standby* dengan *perfect switch*, penggantian peralatan, penambahan peralatan *redundant* dengan struktur paralel dan penggantian peralatan, dan penambahan peralatan *redundant* dengan struktur *cold standby* dengan *perfect switch* dan penggantian peralatan.

#### 5.3.1 Skenario Perbaikan 1

Skenario perbaikan 1 dilakukan dengan menambah peralatan *redundant* untuk peralatan *coal crusher* dengan struktur paralel. Gambar 5.3 merupakan *reliability block diagram* subsistem *coal burner* dengan penambahan peralatan *coal crusher* secara paralel.



Gambar 5.3 *Reliability Block Diagram* Subsistem *Coal Burner* Perbaikan Struktur Paralel

Perhitungan keandalan sistem perbaikan dilakukan menggunakan pendekatan distribusi *phase-type* dengan *input* parameter distribusi *phase-type* sesuai hasil *fitting* pada Subbab 4.3 untuk masing-masing peralatan. Tabel 5.6 merupakan nilai keandalan sistem dengan penerapan struktur paralel.

Tabel 5.6 Hasil Perhitungan Keandalan Sistem Perbaikan Skenario 1

Subsistem	$R_{subsystem}(720)$	$R_{sistem}(720)$
<i>Pre Neutralizer</i>	0,9723	0,4568
<i>Solid Raw Material</i>	0,9100	
<i>Reaction Scrubbing &amp; Granulation</i>	0,9588	
<i>Tail Gas Scrubber</i>	0,9988	
<i>Coal Burner</i>	0,8589	
<i>Recycle Loop &amp; Furnace</i>	0,9280	
<i>Coating Oil</i>	0,9610	
<i>Final Product</i>	0,7039	

Tabel 5.7 Rekap Hasil Perhitungan Nilai Keandalan Sistem dan *Hazard* Sistem pada Skenario 1

$t$	$R_{sistem}(t)$	$h_{sistem}(t)$
0	1	0,0008
36	0,9603	0,0009
72	0,9259	0,0009
108	0,8908	0,0010
144	0,8570	0,0010
180	0,8192	0,0010
216	0,7930	0,0010
252	0,7627	0,0011
288	0,7335	0,0011
324	0,7054	0,0011
360	0,6783	0,0012
396	0,6522	0,0012
432	0,6271	0,0012
468	0,6029	0,0012
504	0,5796	0,0013
540	0,5571	0,0013
576	0,5355	0,0013
612	0,5147	0,0014

Tabel 5.7 Rekap Hasil Perhitungan Nilai Keandalan Sistem dan *Hazard* Sistem pada Skenario 1 (Lanjutan)

$t$	$R_{sistem}(t)$	$h_{sistem}(t)$
0	1	0,0008
36	0,9603	0,0009
72	0,9259	0,0009
108	0,8908	0,0010
144	0,8570	0,0010
180	0,8192	0,0010
216	0,7930	0,0010
252	0,7627	0,0011
288	0,7335	0,0011
324	0,7054	0,0011
360	0,6783	0,0012
396	0,6522	0,0012
432	0,6271	0,0012
468	0,6029	0,0012
504	0,5796	0,0013
540	0,5571	0,0013
576	0,5355	0,0013
612	0,5147	0,0014
648	0,4947	0,0014
684	0,4754	0,0014
720	0,4568	0,0015

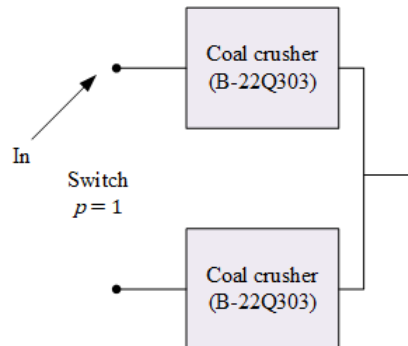
Berdasarkan hasil perhitungan pada Tabel 5.6 terjadi peningkatan nilai keandalan sistem pada  $t = 720$  jam sebesar 10,9% dari kondisi eksisting. Penggunaan struktur paralel memungkinkan sistem dapat beroperasi bila terdapat setidaknya satu peralatan yang berfungsi sehingga sistem tidak langsung mengalami kegagalan.

### 5.3.2 Skenario Perbaikan 2

Skenario perbaikan 2 dilakukan dengan menambah peralatan *redundant* untuk peralatan *coal crusher* dengan struktur *cold standby* dengan *perfect switch*. Gambar 5.4 merupakan struktur *standby perfect switch* pada peralatan *coal crusher*. Pada struktur *standby perfect switch*, *switching device* memiliki probabilitas berfungsi dengan baik sebesar 1 sehingga tidak terjadi kegagalan pada sistem yang



disebabkan oleh kegagalan *switching device*. Tabel 5.8 merupakan hasil perhitungan nilai keandalan dengan penerapan struktur *standby perfect switch*.



Gambar 5.4 Struktur *Standby Perfect Switch* Peralatan *Coal Crusher*

Tabel 5.8 Hasil Perhitungan Keandalan Sistem Perbaikan Skenario 2

Subsistem	$R_{\text{subsistem}}(720)$	$R_{\text{sistem}}(720)$
<i>Pre Neutralizer</i>	0,9723	0,4634
<i>Solid Raw Material</i>	0,9100	
<i>Reaction Scrubbing &amp; Granulation</i>	0,9588	
<i>Tail Gas Scrubber</i>	0,9988	
<i>Coal Burner</i>	0,8712	
<i>Recycle Loop &amp; Furnace</i>	0,9280	
<i>Coating Oil</i>	0,9610	
<i>Final Product</i>	0,7039	

Tabel 5.9 Rekap Hasil Perhitungan Nilai Keandalan Sistem dan *Hazard* Sistem pada Skenario 2

$t$	$R_{\text{sistem}}(t)$	$h_{\text{sistem}}(t)$
0	1	0,0008
36	0,9626	0,0009
72	0,9265	0,0009
108	0,8909	0,0009
144	0,8606	0,0010
180	0,8340	0,0010
216	0,8048	0,0010
252	0,7777	0,0010
288	0,7533	0,0011

Tabel 5.9 Rekap Hasil Perhitungan Nilai Keandalan Sistem dan *Hazard* Sistem pada Skenario 2 (Lanjutan)

$t$	$R_{sistem}(t)$	$h_{sistem}(t)$
324	0,7209	0,0011
360	0,6934	0,0011
396	0,6670	0,0012
432	0,6386	0,0012
468	0,6169	0,0012
504	0,5958	0,0012
540	0,5705	0,0013
576	0,5485	0,0013
612	0,5262	0,0013
648	0,5071	0,0014
684	0,4853	0,0014
720	0,4634	0,0014

Penerapan sistem redundansi dengan struktur *standby perfect switch* memberikan peningkatan nilai keandalan sistem yang lebih tinggi dari penerapan sistem redundansi dengan struktur paralel. Berdasarkan hasil perhitungan nilai keandalan sistem pada Tabel 5.8 peningkatan nilai keandalan sistem pada  $t = 720$  jam yaitu sebesar 12,5% dari kondisi eksisting. Hal tersebut disebabkan oleh sistem *standby* dengan *cold standby* di mana peralatan *redundant* hanya memiliki laju kegagalan ketika aktif digunakan. Peralatan *redundant* tidak mengalami kegagalan ketika dalam kondisi *standby* atau tidak digunakan. Penambahan jumlah peralatan yang sama dengan struktur *standby perfect switch* memberikan peningkatan keandalan sistem yang lebih tinggi dibandingkan dengan struktur paralel.

### 5.3.3 Skenario Perbaikan 3

Skenario perbaikan 3 dilakukan dengan mengganti peralatan pada peralatan *dryer*, *cooler*, dan *coater*. Penggantian peralatan dilakukan berdasarkan kondisi perusahaan yaitu redundansi untuk peralatan *dryer*, *cooler*, dan *coater* tidak mungkin dilakukan karena keterbatasan luas wilayah pabrik. Peralatan baru tersebut memiliki *failure rate* yang lebih rendah dari peralatan eksisting sehingga peralatan memiliki nilai keandalan yang lebih tinggi. Tabel 5.10 merupakan hasil perhitungan nilai keandalan sistem dengan penggantian peralatan.

Tabel 5.10 Hasil Perhitungan Keandalan Sistem Perbaikan Skenario 3

Subsistem	$R_{subsistem}(720)$	$R_{sistem}(720)$
<i>Pre Neutralizer</i>	0,9723	0,5585
<i>Solid Raw Material</i>	0,9100	
<i>Reaction Scrubbing &amp; Granulation</i>	0,9588	
<i>Tail Gas Scrubber</i>	0,9988	
<i>Coal Burner</i>	0,8827	
<i>Recycle Loop &amp; Furnace</i>	0,9280	
<i>Coating Oil</i>	0,9610	
<i>Final Product</i>	0,8374	

Tabel 5.11 Rekap Hasil Perhitungan Nilai Keandalan Sistem dan *Hazard* Sistem pada Skenario 3

$t$	$R_{sistem}(t)$	$h_{sistem}(t)$
0	1	0,0008
36	0,9717	0,0008
72	0,9442	0,0008
108	0,9174	0,0009
144	0,8914	0,0009
180	0,8660	0,0009
216	0,8413	0,0009
252	0,8173	0,0010
288	0,7939	0,0010
324	0,7712	0,0010
360	0,7491	0,0010
396	0,7275	0,0011
432	0,7066	0,0011
468	0,6862	0,0011
504	0,6664	0,0011
540	0,6472	0,0011
576	0,6284	0,0011
612	0,6102	0,0012
648	0,5925	0,0012
684	0,5753	0,0012
720	0,5585	0,0012

Penggantian peralatan yang memiliki *failure rate* lebih rendah memberikan nilai keandalan peralatan yang lebih tinggi sehingga terjadi peningkatan keandalan sistem. Berdasarkan hasil perhitungan nilai keandalan

sistem pada Tabel 5.10 peningkatan nilai keandalan sistem pada  $t = 720$  jam yaitu sebesar 35,5% dibandingkan kondisi eksisting. Akan tetapi dari segi biaya penggantian peralatan akan menimbulkan biaya yang lebih besar dari penerapan sistem redundansi.

#### 5.3.4 Skenario Perbaikan 4

Skenario perbaikan 4 dilakukan dengan menerapkan struktur paralel pada peralatan *coal crusher* dan mengganti peralatan *dryer*, *cooler*, dan *coater*. Tabel 5.12 merupakan hasil perhitungan nilai keandalan dengan penggantian peralatan dan penerapan struktur paralel pada peralatan *redundant*.

Tabel 5.12 Hasil Perhitungan Keandalan Sistem Perbaikan Skenario 4

Subsistem	$R_{subsistem}(720)$	$R_{sistem}(720)$
<i>Pre Neutralizer</i>	0,9723	0,5868
<i>Solid Raw Material</i>	0,9100	
<i>Reaction Scrubbing &amp; Granulation</i>	0,9588	
<i>Tail Gas Scrubber</i>	0,9988	
<i>Coal Burner</i>	0,9275	
<i>Recycle Loop &amp; Furnace</i>	0,9280	
<i>Coating Oil</i>	0,9610	
<i>Final Product</i>	0,8374	

Tabel 5.13 Rekap Hasil Perhitungan Nilai Keandalan Sistem dan *Hazard* Sistem pada Skenario 4

$t$	$R_{sistem}(t)$	$h_{sistem}(t)$
0	1	0,0008
36	0,9744	0,0008
72	0,9494	0,0008
108	0,9249	0,0008
144	0,9010	0,0008
180	0,8777	0,0009
216	0,8548	0,0009
252	0,8326	0,0009
288	0,8108	0,0009

Tabel 5.13 Rekap Hasil Perhitungan Nilai Keandalan Sistem dan *Hazard* Sistem pada Skenario 4 (Lanjutan)

$t$	$R_{sistem}(t)$	$h_{sistem}(t)$
324	0,7896	0,0009
360	0,7688	0,0010
396	0,7486	0,0010
432	0,7288	0,0010
468	0,7095	0,0010
504	0,6907	0,0010
540	0,6723	0,0011
576	0,6543	0,0011
612	0,6368	0,0011
648	0,6198	0,0011
684	0,6031	0,0012
720	0,5868	0,0012

Berdasarkan hasil perhitungan pada Tabel 5.12 Penggantian peralatan dan penerapan sistem redundansi dengan struktur paralel memberikan peningkatan nilai keandalan sistem pada  $t = 720$  jam yaitu sebesar 42,4% dari kondisi eksisting. Penggantian peralatan dan penerapan sistem redundansi dengan struktur paralel memberikan nilai keandalan sistem yang lebih tinggi dari penerapan struktur paralel dan penggantian peralatan secara terpisah.

#### 5.3.5 Skenario Perbaikan 5

Skenario perbaikan 5 dilakukan dengan menerapkan struktur *standby perfect switch* pada peralatan *coal crusher* dan mengganti peralatan *dryer*, *cooler*, dan *coater*. Tabel 5.14 merupakan hasil perhitungan nilai keandalan dengan penggantian peralatan dan penerapan struktur paralel pada peralatan *redundant*.

Tabel 5.14 Hasil Perhitungan Keandalan Sistem Perbaikan Skenario 5

<b>Subsistem</b>	$R_{subsistem}(720)$	$R_{sistem}(720)$
<i>Pre Neutralizer</i>	0,9723	0,6011
<i>Solid Raw Material</i>	0,9100	
<i>Reaction Scrubbing &amp; Granulation</i>	0,9588	
<i>Tail Gas Scrubber</i>	0,9988	
<i>Coal Burner</i>	0,9500	

Tabel 5.14 Hasil Perhitungan Keandalan Sistem Perbaikan Skenario 5 (Lanjutan)

Subsistem	$R_{subsystem}(720)$	$R_{sistem}(720)$
<i>Recycle Loop &amp; Furnace</i>	0,9280	
<i>Coating Oil</i>	0,9610	
<i>Final Product</i>	0,8374	

Tabel 5.15 Rekap Hasil Perhitungan Nilai Keandalan Sistem dan *Hazard* Sistem pada Skenario 5

$t$	$R_{sistem}(t)$	$h_{sistem}(t)$
0	1	0,0008
36	0,9773	0,0008
72	0,9532	0,0008
108	0,9291	0,0008
144	0,9052	0,0008
180	0,8841	0,0008
216	0,8627	0,0009
252	0,8418	0,0009
288	0,8221	0,0009
324	0,8024	0,0009
360	0,7816	0,0009
396	0,7632	0,0009
432	0,7432	0,0010
468	0,7252	0,0010
504	0,7061	0,0010
540	0,6875	0,0010
576	0,6694	0,0010
612	0,6517	0,0011
648	0,6344	0,0011
684	0,6175	0,0011
720	0,6011	0,0011

Penggantian peralatan dan penerapan struktur *standby perfect* memberikan nilai keandalan sistem yang paling tinggi dibandingkan dengan skenario lainnya. Peningkatan nilai keandalan sistem pada  $t = 720$  jam yaitu sebesar 45,9% dibandingkan kondisi eksisting. Namun penerapan skenario ini akan memberikan biaya yang paling besar sebagai akibat dari penggantian peralatan, pengadaan peralatan *redundant*, dan pengadaan *switching device* atau *failure detector*.

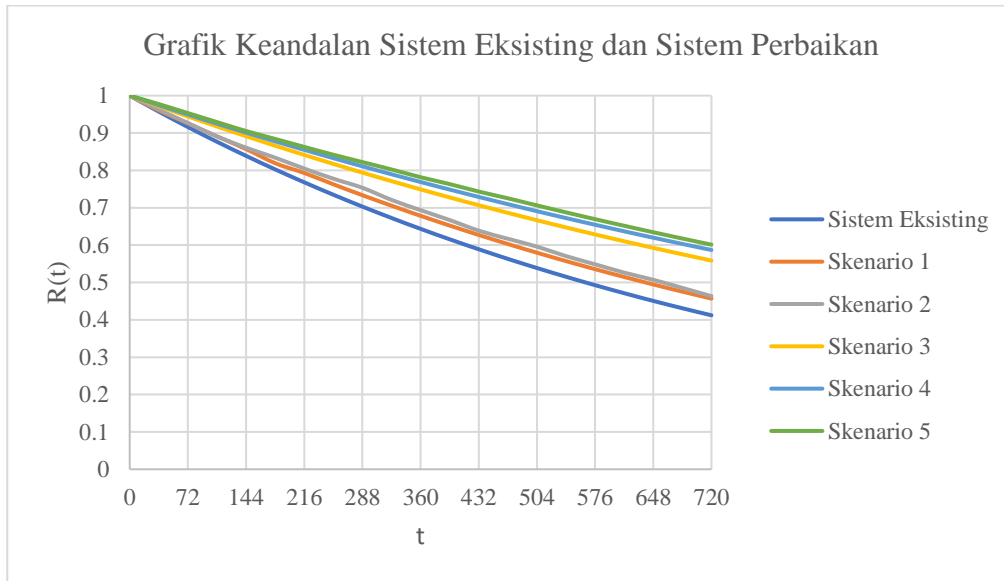
### 5.3.6 Analisis Skenario Perbaikan

Skenario perbaikan sistem yang diusulkan memberikan dampak terhadap peningkatan nilai keandalan sistem yang berbeda-beda. Tabel 5.16 merupakan rekapitulasi nilai keandalan sistem pada  $t = 720$  jam dan *mean time to failure* sistem untuk setiap skenario perbaikan.

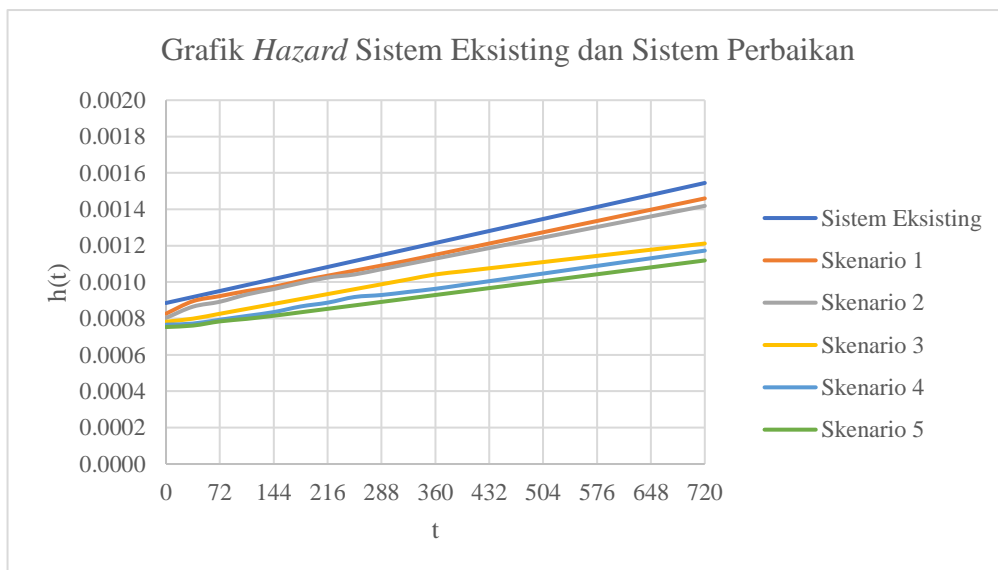
Tabel 5.16 Rekap Nilai Keandalan Sistem Perbaikan

No	Skenario	$R_{sistem}(720)$	$h_{sistem}(720)$	MTTF (Jam)
1	Penerapan Struktur Paralel	0,4568	$14,6 \times 10^{-4}$	774,070
2	Penerapan Struktur <i>Standby Perfect</i>	0,4634	$14,2 \times 10^{-4}$	811,874
3	Penggantian Peralatan	0,5585	$12,1 \times 10^{-4}$	985,786
4	Penggantian Peralatan dan Penerapan Struktur Paralel	0,5868	$11,7 \times 10^{-4}$	1130,300
5	Penggantian Peralatan dan Penerapan Struktur <i>Standby Perfect</i>	0,6011	$11,2 \times 10^{-4}$	1180,126

Berdasarkan nilai keandalan sistem pada Tabel 5.16 skenario 5 memberikan nilai keandalan sistem yang paling tinggi pada  $t = 720$  jam dibandingkan dengan skenario lainnya. Namun dari segi biaya skenario 5 akan menimbulkan biaya paling tinggi untuk pengadaan peralatan pengganti, pengadaan peralatan *redundant*, dan pengadaan *switching device* atau *fault detector*. Peningkatan nilai keandalan sistem menunjukkan peningkatan probabilitas sistem beroperasi tanpa kegagalan. Peningkatan nilai keandalan sistem berpengaruh pada *availability* pabrik karena menurunnya probabilitas sistem mengalami kegagalan sehingga waktu yang dibutuhkan untuk *repair* dapat berkurang. Berdasarkan skenario perbaikan sistem yang diusulkan maka dapat diketahui peningkatan nilai keandalan sistem yang akan didapatkan. Skenario perbaikan yang diusulkan juga memberikan pengaruh terhadap penurunan nilai *hazard* sistem. Nilai keandalan sistem dan nilai *hazard* sistem pada Tabel 5.16 tidak dapat menunjukkan *behavior* penurunan keandalan sistem. Gambar 5.5 dan Gambar 5.6 merupakan grafik keandalan sistem perbaikan dan grafik *hazard* sistem perbaikan untuk setiap skenario.



Gambar 5.5 Grafik Keandalan Sistem Eksisting dan Sistem Perbaikan  $t = 0$  hingga  $t = 720$



Gambar 5.6 Grafik *Hazard* Sistem Eksisting dan Sistem Perbaikan  $t = 0$  hingga  $t = 720$

Berdasarkan Gambar 5.5 keandalan sistem pada skenario 1 memiliki penurunan yang paling signifikan dibandingkan dengan skenario perbaikan lainnya. Sementara itu skenario 5 memiliki pola penurunan keandalan sistem yang paling landai. Grafik keandalan sistem menunjukkan pola penurunan tingkat keandalan



pada suatu waktu dan informasi mengenai tingkat keandalan sistem menjadi lebih lengkap. Selain itu dengan melihat grafik keandalan maka dapat ditentukan waktu untuk melakukan pemeliharaan sehingga sistem dapat berada pada tingkat keandalan tertentu. Informasi tersebut dapat digunakan perusahaan dalam melakukan perencanaan pemeliharaan disesuaikan dengan keandalan sistem dan kebijakan perusahaan dalam melakukan pemeliharaan serta target *availability* atau *stream days* perusahaan.

Grafik *hazard* sistem menunjukkan *behavior* dari proses kegagalan yang terjadi pada sistem. Berdasarkan Gambar 5.6 sistem eksisting dan sistem perbaikan memiliki pola *increasing failure rate*. *Increasing failure rate* yang terjadi pada peralatan mekanik disebabkan oleh penurunan fungsi seiring waktu. Berdasarkan Gambar 5.6 skenario 5 memiliki nilai *hazard rate* yang paling rendah dibandingkan skenario lainnya. Perbaikan sistem yang diusulkan memberikan pengaruh terhadap peningkatan keandalan sistem dan penurunan *hazard rate*. Selain peningkatan keandalan sistem dan penurunan *hazard rate*, skenario perbaikan sistem juga memberikan pengaruh terhadap peningkatan nilai *mean time to failure* sehingga sistem dapat beroperasi lebih lama sebelum terjadi kegagalan. Peningkatan nilai *mean time to failure* memberikan pengaruh terhadap peningkatan *availability* pabrik. Tabel 5.17 merupakan nilai *availability* dan *stream days* pabrik untuk setiap skenario perbaikan.

Tabel 5.17 Hasil Perhitungan *Stream Days* Sistem Perbaikan

Skenario	MTTF (Hari)	MTTR (Hari)	Availability	Stream Days
1	32,253	5	0,866	316,011
2	33,828	5	0,871	317,998
3	41,074	5	0,891	325,390
4	47,096	5	0,904	329,968
5	49,172	5	0,908	331,311

Skenario perbaikan yang diusulkan memberikan peningkatan performansi sistem dalam hal nilai keandalan, *hazard rate*, *mean time to failure*, dan *availability*. Skenario 5 memberikan performansi sistem terbaik dibandingkan dengan skenario lainnya. Salah satu tujuan dari peningkatan keandalan sistem adalah untuk

mencapai target *stream days* pabrik. Berdasarkan Tabel 5.17 target *stream days* pabrik sebesar 320 hari dapat tercapai dengan menerapkan skenario 3, skenario 4, dan skenario 5. Analisis kelayakan finansial pada skenario perbaikan perlu dilakukan untuk mendukung keputusan pemilihan skenario.

Skenario perbaikan yang diusulkan didasarkan pada analisis sensitivitas pada  $t = 0$  jam hingga  $t = 720$  jam. Waktu atau  $t$  merupakan faktor yang berpengaruh terhadap keandalan dalam hal sensitivitas. Tabel 5.18 dan Tabel 5.19 merupakan rekap hasil perhitungan nilai keandalan sistem dan nilai *hazard* sistem setiap skenario perbaikan pada  $t = 0$  jam hingga  $t = 8760$  jam.

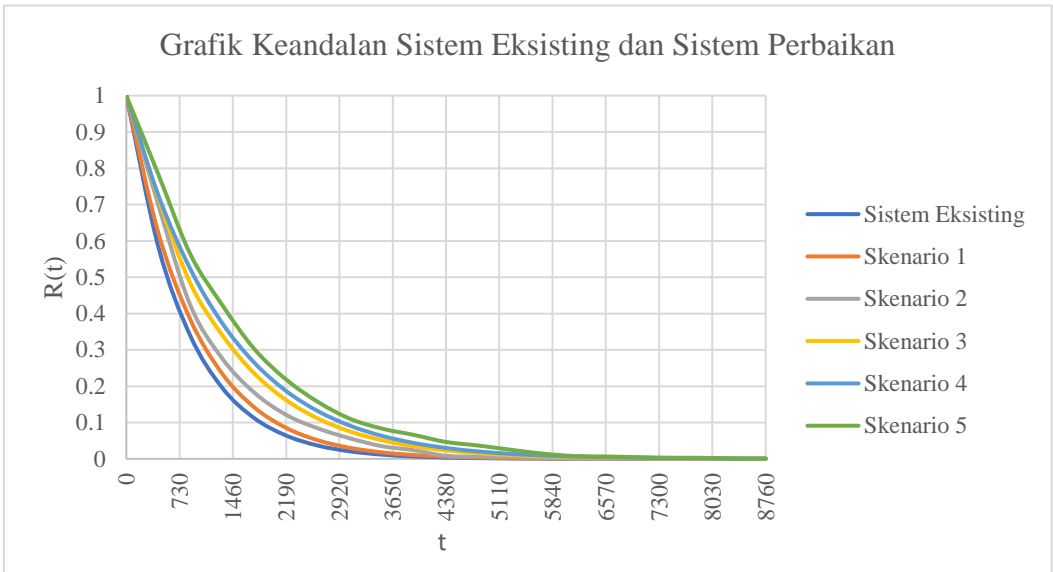
Tabel 5.18 Rekap Hasil Perhitungan Nilai Keandalan Sistem Perbaikan  $t = 0$  hingga  $t = 8760$

$t$	$R_{sistem}(t)$				
	Skenario 1	Skenario 2	Skenario 3	Skenario 4	Skenario 5
0	1	1	1	1	1
438	0,5844	0,6230	0,6993	0,7194	0,7263
876	0,3392	0,3841	0,4237	0,4839	0,5230
1314	0,1957	0,2346	0,2764	0,3410	0,3737
1752	0,1123	0,1420	0,1826	0,2355	0,2651
2190	0,0641	0,0854	0,1212	0,1618	0,1869
2628	0,0364	0,0509	0,0837	0,1107	0,1309
3066	0,0206	0,0302	0,0564	0,0754	0,0912
3504	0,0116	0,0178	0,0349	0,0511	0,0632
3942	0,0065	0,0104	0,0237	0,0346	0,0436
4380	0,0037	0,0061	0,0084	0,0233	0,0300
4818	0,0020	0,0035	0,0058	0,0156	0,0205
5256	0,0011	0,0020	0,0047	0,0105	0,0140
5694	0,0006	0,0012	0,0029	0,0070	0,0095
6132	0,0003	0,0007	0,0009	0,0047	0,0064
6570	0,0002	0,0004	0,0007	0,0031	0,0043
7008	1,1,E-04	0,0002	0,0006	0,0020	0,0029
7446	5,8,E-05	1,26,E-04	0,0004	0,0014	0,0020
7884	3,18,E-05	7,12,E-05	9,47,E-05	0,0009	0,0013
8322	1,74,E-05	4,02,E-05	7,24,E-05	0,0006	0,0009
8760	1,01,E-05	2,30,E-05	5,78,E-05	0,0004	0,0006

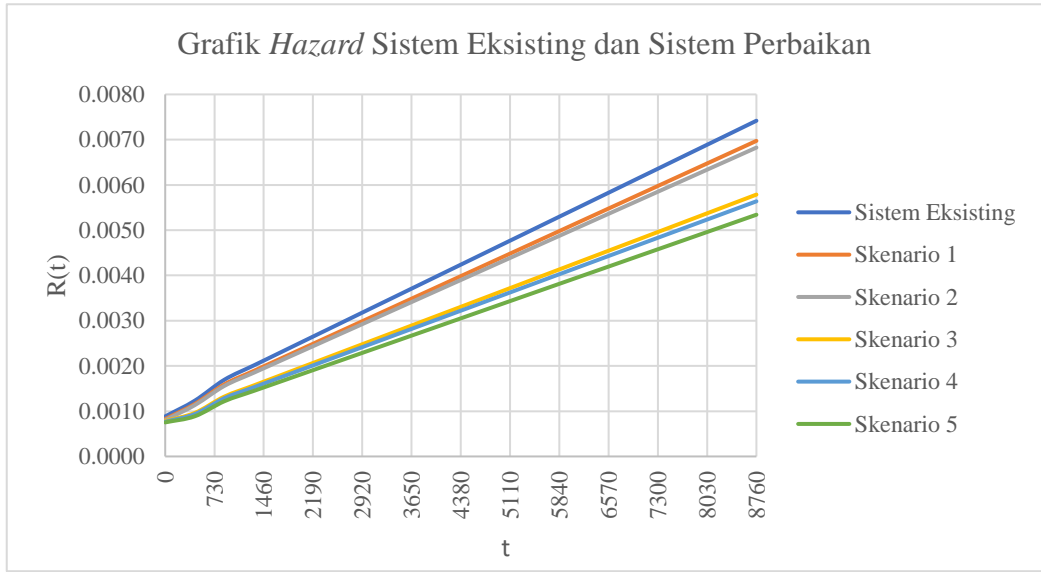
Tabel 5.19 Rekap Hasil Perhitungan Nilai *Hazard* Sistem Perbaikan  $t = 0$  hingga  $t = 8760$

$t$	$h_{sistem}(t)$				
	Skenario 1	Skenario 2	Skenario 3	Skenario 4	Skenario 5
0	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008
438	0,0012	0,0011	0,0010	0,0010	0,0009
876	0,0016	0,0016	0,0013	0,0013	0,0012
1314	0,0019	0,0019	0,0016	0,0015	0,0014
1752	0,0022	0,0021	0,0018	0,0018	0,0017
2190	0,0025	0,0024	0,0021	0,0020	0,0019
2628	0,0028	0,0027	0,0023	0,0023	0,0021
3066	0,0031	0,0030	0,0026	0,0025	0,0024
3504	0,0034	0,0033	0,0028	0,0027	0,0026
3942	0,0037	0,0036	0,0031	0,0030	0,0028
4380	0,0040	0,0039	0,0033	0,0032	0,0031
4818	0,0043	0,0042	0,0036	0,0035	0,0033
5256	0,0046	0,0045	0,0038	0,0037	0,0035
5694	0,0049	0,0048	0,0040	0,0039	0,0037
6132	0,0052	0,0051	0,0043	0,0042	0,0040
6570	0,0055	0,0054	0,0045	0,0044	0,0042
7008	0,0058	0,0057	0,0048	0,0047	0,0044
7446	0,0061	0,0059	0,0050	0,0049	0,0047
7884	0,0064	0,0062	0,0053	0,0052	0,0049
8322	0,0067	0,0065	0,0055	0,0054	0,0051
8760	0,0070	0,0068	0,0058	0,0056	0,0053

Berdasarkan Tabel 5.18 waktu merupakan faktor yang mempengaruhi keandalan. Sistem mengalami penurunan nilai keandalan seiring waktu yang disebabkan oleh pemakaian dan penuaan peralatan. Gambar 5.7 dan Gambar 5.8 merupakan grafik keandalan sistem dan grafik *hazard* sistem eksisting dan sistem perbaikan pada  $t = 0$  jam hingga  $t = 8760$  jam.



Gambar 5.7 Grafik Keandalan Sistem Eksisting dan Sistem Perbaikan  $t = 0$  hingga  $t = 8760$



Gambar 5.8 Grafik *Hazard* Sistem Eksisting dan Sistem Perbaikan  $t = 0$  hingga  $t = 8760$

Analisis sensitivitas yang dilakukan pada  $t = 0$  jam hingga  $t = 8760$  jam pada Gambar 5.7 memberikan *behavior* penurunan keandalan sistem yang sama dengan hasil analisis sensitivitas pada  $t = 0$  jam hingga  $t = 720$  jam pada Gambar 5.5. Sistem mengalami penurunan keandalan seiring waktu dengan nilai keandalan paling rendah untuk sistem perbaikan yaitu pada skenario 1 dan nilai

keandalan paling tinggi pada skenario 5. Grafik *hazard* sistem pada  $t = 0$  jam hingga  $t = 8760$  jam pada Gambar 5.8 juga menunjukkan *behavior* proses kegagalan yang sama dengan kondisi  $t = 0$  jam hingga  $t = 720$  jam pada Gambar 5.6. Sistem memiliki pola *increasing failure rate* dengan nilai *hazard* yang paling tinggi pada sistem perbaikan yaitu pada skenario 1 dan nilai *hazard* yang paling rendah pada skenario 5.

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## BAB 6

### KESIMPULAN DAN SARAN

Pada bab ini akan dilakukan penarikan kesimpulan berdasarkan penelitian yang telah dilakukan untuk menjawab tujuan penelitian dan saran untuk penelitian selanjutnya.

#### 6.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan maka kesimpulan yang akan menjawab tujuan dari penelitian ini yaitu sebagai berikut.

1. Perhitungan keandalan sistem dengan menggunakan metode skalar dilakukan berbasis nilai keandalan. Nilai keandalan sistem didapatkan dari nilai keandalan subsistem dan nilai keandalan subsistem didapatkan dari nilai keandalan peralatan pada suatu titik waktu. Perhitungan keandalan berbasis nilai keandalan tidak dapat mengakomodasi keandalan sebagai fungsi waktu. Hasil perhitungan keandalan sistem eksisting yang dilakukan pada  $t = 8760$  jam memberikan nilai keandalan sebesar  $1,011 \times 10^{-5}$  dan nilai *mean time to failure* sistem sebesar 714,53 jam.
2. Perhitungan keandalan sistem dengan menggunakan distribusi *phase-type* memberikan hasil berupa fungsi keandalan. Fungsi keandalan memberikan informasi yang kaya dalam melakukan analisis dan memudahkan dalam melakukan perhitungan. Perhitungan keandalan sistem eksisting dengan model keandalan yang menggunakan distribusi *phase-type* memberikan nilai keandalan sistem pada  $t = 8760$  jam sebesar  $1,011 \times 10^{-5}$ , nilai *hazard rate* sebesar  $74,72 \times 10^{-4}$ , dan nilai *mean time to failure* sistem sebesar 714,53 jam.
3. Analisis sensitivitas dilakukan untuk mencari faktor-faktor yang mempengaruhi keandalan sistem sehingga dapat digunakan untuk mencari solusi bagaimana meningkatkan keandalan sistem. Faktor yang dianalisis yaitu perubahan struktur sistem dengan menerapkan redundansi secara paralel dan *standby perfect* serta penggantian peralatan. Skenario perbaikan yang memberikan nilai keandalan sistem terbaik yaitu skenario penggantian peralatan dan penerapan struktur *standby perfect* dengan nilai

keandalan sistem pada  $t = 720$  jam sebesar 0,6011, nilai *hazard rate*  $11,2 \times 10^{-4}$ , dan nilai *mean time to failure* 1080,126 jam.

## 6.2 **Saran**

Saran yang diberikan untuk penelitian selanjutnya yaitu sebagai berikut.

1. Melakukan analisis kelayakan finansial untuk pemilihan skenario peningkatan keandalan sistem.
2. Melakukan simulasi diskrit yang dapat mengakomodasi MTTR stokastik untuk mengetahui pengaruh peningkatan keandalan sistem terhadap *stream days* pabrik.



## DAFTAR PUSTAKA

- Agrawal, A. K., Murthy, V., & Chattopadhyaya, S. (2019). Investigations Into Reliability, Maintainability and Availability of Tunnel Boring Machine Operating in Mixed Ground Condition Using Markov Chains. *Engineering Failure Analysis*, 477-489.
- Alkaff, A., & Qomarudin, M. N. (2020). Modeling and Analysis of System Reliability Using Phase-Type Distribution Closure Properties. *Applied Stochastic Models in Business and Industry*, 1-22.
- Ardakan, M. A., Mirzaeli, Z., Hamdani, A. Z., & Elsayed, E. A. (2017). Reliability Optimization by Considering Time- Dependent Reliability for Components. *Quality and Reliability Engineering International*, 1641-1654.
- Bauer, E., Zhang, X., & Kimber, D. A. (2009). *Practical System Reliability*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Buchholz, P., Kriege, J., & Felko, I. (2014). *Input Modeling with Phase-Type Distributions and Markov Models Theory and Applications*. London: Springer Briefs in Mathematics.
- Campbell, J. D., Jardine, A. K., & McGlynn, J. (2011). *Asset Management Excellence Optimizing Equipment Life-Cycle Decisions*. Boca Raton: CRC Press.
- Daellenbach, H. G., McNickle, D. C., & Dye, S. (2012). *Management Science Decision Making Through Systems Thinking 2nd Edition*. New York: Palgrave Macmillan.
- Dhillon, B. (2006). *Maintainability, Maintenance, and Reliability for Engineers*. Boca Raton: Taylor & Francis Group.
- Elsayed, E. A. (2012). *Reliability Engineering. 2nd ed*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Faddy, M. J. (1995). Phase-Type Distributions for Failure Times. *Mathematical and Computer Modelling*, 63-70.
- Groover, M. P. (2015). *Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing. 4th ed. .* New Jersey: Pearson.
- Harrell, D., Ghosh, D., & Bowden, D. (2000). *Simulation Using Promodel (2nd ed.)*. New York: McGraw Hill.

- Haynes, S., Hermann, J. W., & Zimerman, P. (2018). Using Discrete Event Simulation to Improve Aircraft Engine Reliability Forecasts. *Preventive Maintenance Models*, 1-6.
- Kelton, W. D., Sadowski, R. P., & Zupick, N. B. (2014). *Simulation with Arena* (6th ed.). New York: Mc Graw Hill Education.
- Kim, H., & Kim, P. (2016). Reliability Engineering for a Nonrepairable System with Heterogeneous Components Having a Phase-Type Time-To-Failure Distribution. *Reliability Engineering and System Safety*, 37-46.
- Koc, H., Shaik, S. S., & Madupu, P. P. (2019). Reliability Modeling and Analysis for Cyber Physical Systems. *2019 IEEE 9th Annual Computing and Communication Workshop and Conference, CCWC 2019*, 448-451.
- Law, A. M. (2014). *Simulation Modeling and Analysis*. 5th ed. New York: Mc Graw Hill.
- Li, X., Duan, F., Mba, D., & Bennett, I. (2017). Multidimensional Prognostics for Rotating Machinery: A Review. *Advances in Mechanical Engineering*, 1-20.
- Neuts, M. F. (1994). *Matrix-Geometric Solutions in Stochastic Models an Algorithmic Approach*. New York: Dover Publications, Inc.
- Pukite, J., & Pukite, P. (1998). *Modeling for Reliability Analysis Markov Modeling for Reliability, Maintainability, Safety, and Supportability Analysis of Complex Computer System*. New York: IEEE Press.
- Riascos-Ochoa, J., Sanchez-Silva, M., & Akhavan-Tabatabaei, R. (2014). Reliability Analysis of Shock-Based Deterioration Using Phase-Type Distributions. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 88-101.
- SINTEF Industrial Management. (2002). *OREDA: Offshore Reliability Data Handbook* (4th ed.). Høvik: Det Norske Veritas.
- Soleimani, M., Pourgol-Mohammad, M., Rostami, A., & Ghanbari, A. (2014). Design for Reliability of Complex System: Case Study of Horizontal Drilling Equipment with Limited Failure Data. *Journal of Quality and Reliability Engineering*, 1-13.

Trivedi, K. S., & Bobbio, A. (2017). *Reliability and Availability Engineering Modeling, Analysis, and Applications*. New York: Cambridge University Press.

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## DAFTAR LAMPIRAN

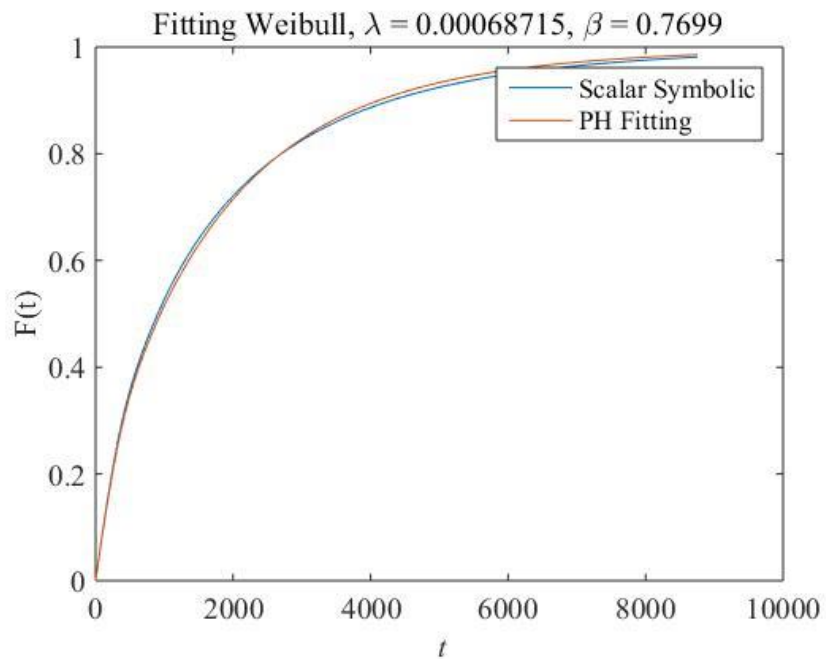
Lampiran 1. Rekap Hasil *Fitting* Data Kerusakan Peralatan ke Distribusi *Phase-Type*

Kode	n	Parameter Distribusi <i>Phase-Type</i>	A	Skalar		Matriks		Kategori
		a		MTTF	CVTTF	MTTF	CVTTF	
B-26M366	1	[1]	$[-0,000039]$	1918,1	1	1914,5	1	CFR
B-26P303A/B	1	[1]	$[-0,00000519]$	192678,2	1	192678	1	CFR
B-26M215	2	[0,7133 0,2867]	$\begin{bmatrix} -0,0004 & 0 \\ 0 & -0,0027 \end{bmatrix}$	1696,8	0,9816	1694,4	0,9753	IFR
B-26M216	1	[1]	$[-0,000018]$	2593,8	1	2593,8	1	DFR
B-22M305	2	[0,8115 0,1885]	$\begin{bmatrix} -0,0004 & 0 \\ 0 & -0,0029 \end{bmatrix}$	1945,4	1,2044	1948,9	1,1464	DFR
B-22M304	1	[1]	$[-0,000019]$	2558,15	1	2558,2	1	CFR
B-26P312A/B	1	[1]	$[-0,00002646]$	37792,9	1	37792	1	CFR
B-22P302A/B	1	[1]	$[-0,00002646]$	37792,9	1	37792	1	CFR
B-22P301A/B	1	[1]	$[-0,00002646]$	37792,9	1	37792	1	CFR
B-22P305A/B	1	[1]	$[-0,00002646]$	37792,9	1	37792	1	CFR
B-22P309	1	[1]	$[-0,00001612]$	62034,8	1	62034	1	CFR
B-22M361	1	[1]	$[-0,000012]$	8333,3	1	8333	1	CFR
B-26C302	1	[1]	$[-0,00009821]$	10182,3	1	10182	1	CFR
B-26P313A/B/C/D	1	[1]	$[-0,00002646]$	37792,9	1	37792	1	CFR
B-26C307	1	[1]	$[-0,00009821]$	10182,3	1	10182	1	CFR
B-22Q303	3	[0,9397 0,0621 0]		7154	0,9997	7012	0,9899	IFR

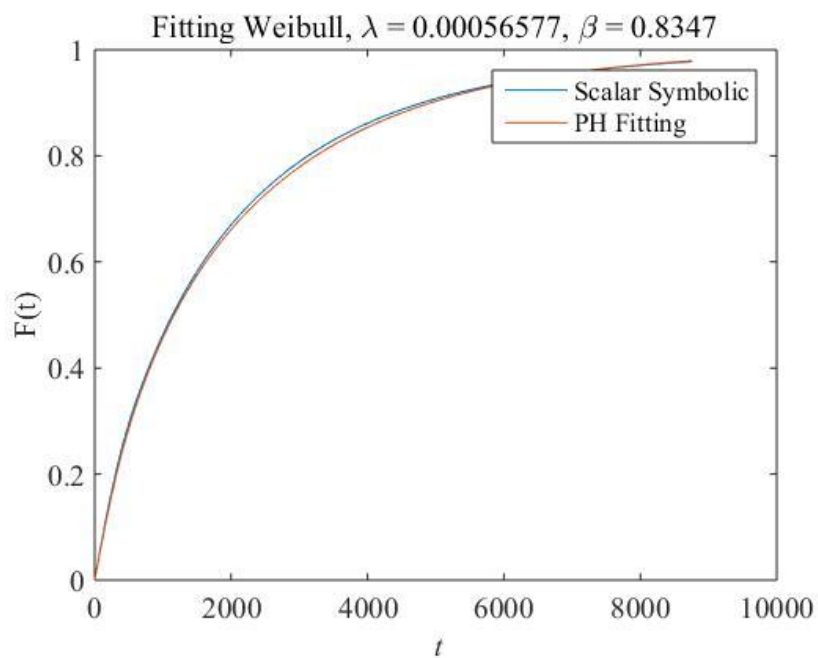
Kode	n	Parameter Distribusi <i>Phase-Type</i>		Skalar		Matriks		Kategori
		<i>a</i>	<i>A</i>	MTTF	CVTTF	MTTF	CVTTF	
			$\begin{bmatrix} -0,0001501 & 0 & 0 \\ 0 & -0,0001625 & 0,0001625 \\ 0 & 0 & -0,0001625 \end{bmatrix}$					
B-22M365	1	[1]	[-0,00002]	5117,5	1,5301	6601	1,5054	CFR
B-22M366	1	[1]	[-0,00003]	3954	1,1202	3851,8	1,1639	CFR
B-26C304A/B	1	[1]	[-0,00009821]	10182	1	10182	1	CFR
B-22M362	3	[0,9596 0,0404 0]	$\begin{bmatrix} -0,0001888 & 0 & 0 \\ 0 & -0,0002171 & 0,0002171 \\ 0 & 0 & -0,0002171 \end{bmatrix}$	5321,9	0,9985	5324,8	0,9981	IFR
B-22M328A/B	1	[1]	[-0,00003]	3578,5	1	3578,5	1	CFR
B-22F301A/B/C/D	1	[1]	[-0,000041]	3266,3	0,6413	3847,6	0,7212	CFR
B-22Q301A/B/C/D	1	[1]	[-0,000035]	2417,6	1	2417,7	1	CFR
B-22M303	2	[0,5109 0,4891]	$\begin{bmatrix} -0,0004455 & 0 \\ 0 & -0,0004492 \end{bmatrix}$	2234,9	0,9206	2235,6	0,996	IFR
B-26P318	1	[1]	[-0,00064967]	1539,2	1	1539,2	1	CFR
B-26P317A/B	1	[1]	[-0,00001212]	82508,3	1	82508	1	CFR

Kode	n	Parameter Distribusi <i>Phase-Type</i>	A	Skalar		Matriks		Kategori
		<i>a</i>		MTTF	CVTTF	MTTF	CVTTF	
B-26M310	3	[0,2925 0,7075 0]	$\begin{bmatrix} -0,0004267 & 0 & 0 \\ 0 & -0,0005006 & 0,0005006 \\ 0 & 0 & -0,0005006 \end{bmatrix}$	3668,5	0,7913	3512,2	0,7961	IFR
B-22M363	2	[0,5104 0,4896]	$\begin{bmatrix} -0,0002125 & 0 \\ 0 & -0,0002164 \end{bmatrix}$	4690,7	0,9971	4664,5	0,999	IFR
B-22M308	1	[1]	[0,00002]	7675,2	1	7314,7	1	CFR
B-22M368	1	[1]	[-0,000024]	3786,2	1	3786,2	1	CFR
B-26M364	2	[0,5126 0,4874]	$\begin{bmatrix} -0,0001909 & 0 \\ 0 & -0,0001939 \end{bmatrix}$	5213,2	0,9901	5198,2	0,9918	IFR
B-22M340	2	[0,6889 0,3111]	$\begin{bmatrix} -0,0001748 & 0 \\ 0 & -0,0007808 \end{bmatrix}$	4422,9	1,2517	4340,2	1,2037	DFR

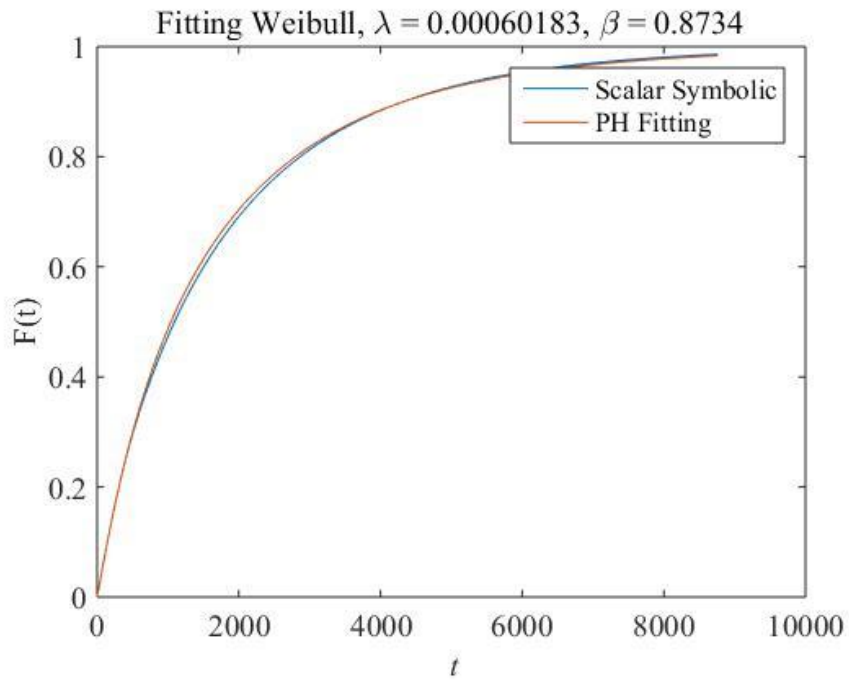




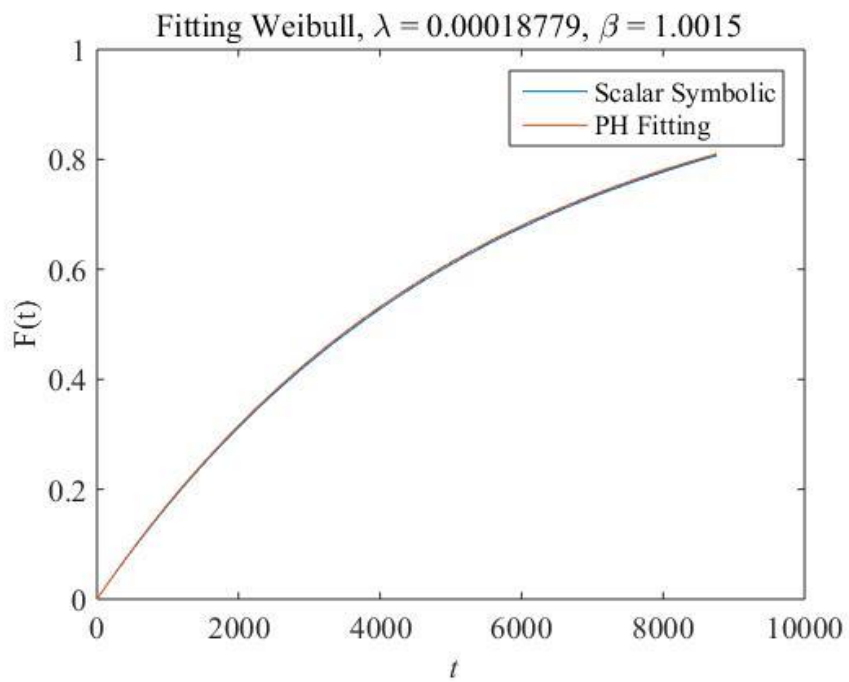
Gambar 1. Grafik CDF Hasil *Fitting* Distribusi *Weibull* Peralatan B26M215 ke Distribusi *Phase-Type*



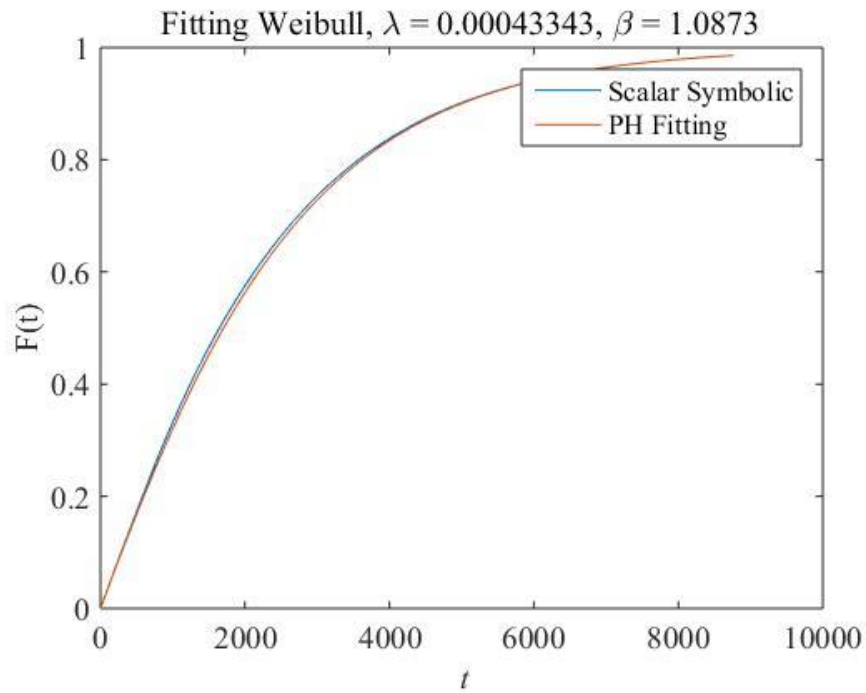
Gambar 2. Grafik CDF Hasil *Fitting* Distribusi *Weibull* Peralatan B22M305 ke Distribusi *Phase-Type*



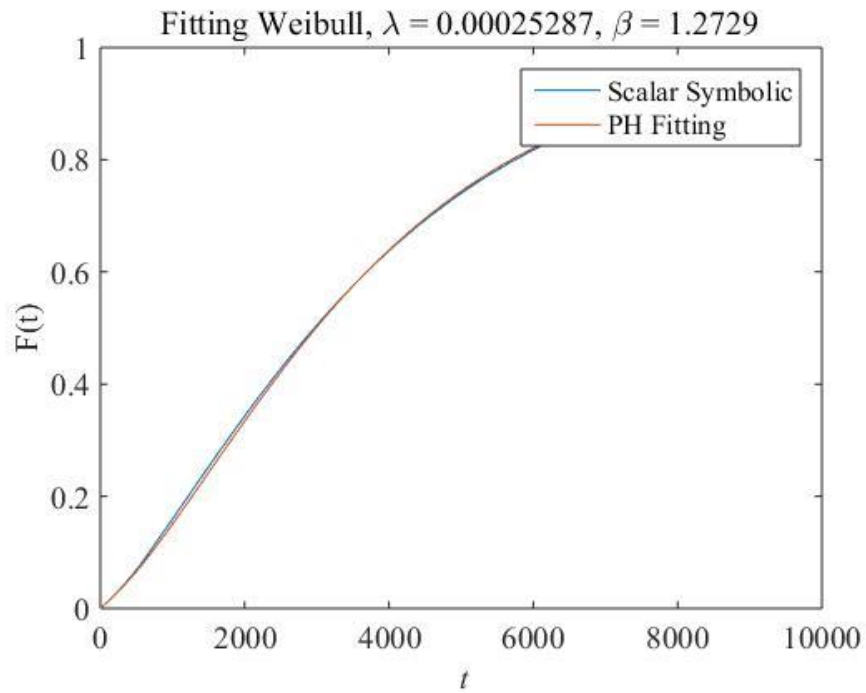
Gambar 3. Grafik CDF Hasil *Fitting* Distribusi *Weibull* Peralatan B22Q303 ke Distribusi *Phase-Type*



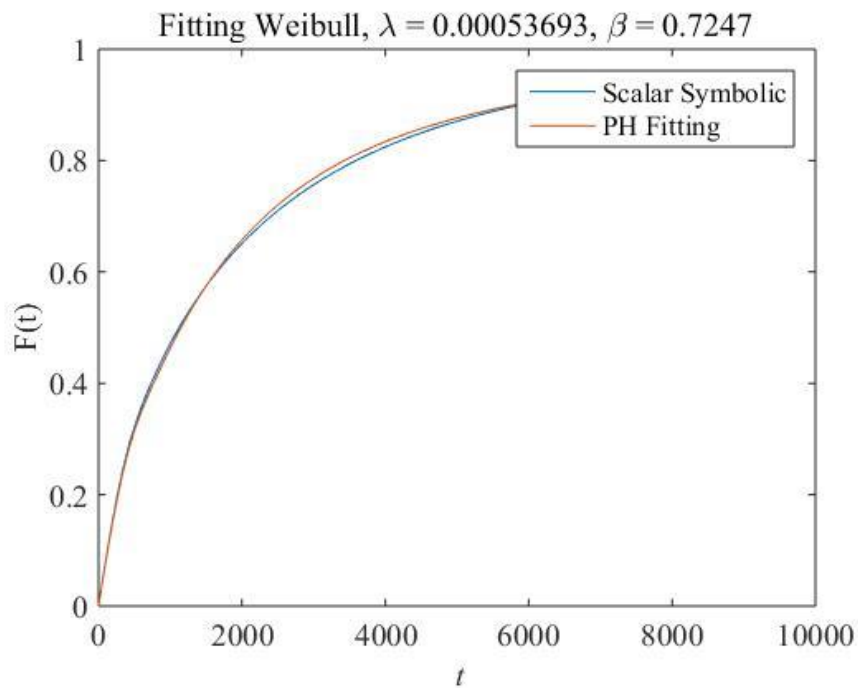
Gambar 4. Grafik CDF Hasil *Fitting* Distribusi *Weibull* Peralatan B22M362 ke Distribusi *Phase-Type*



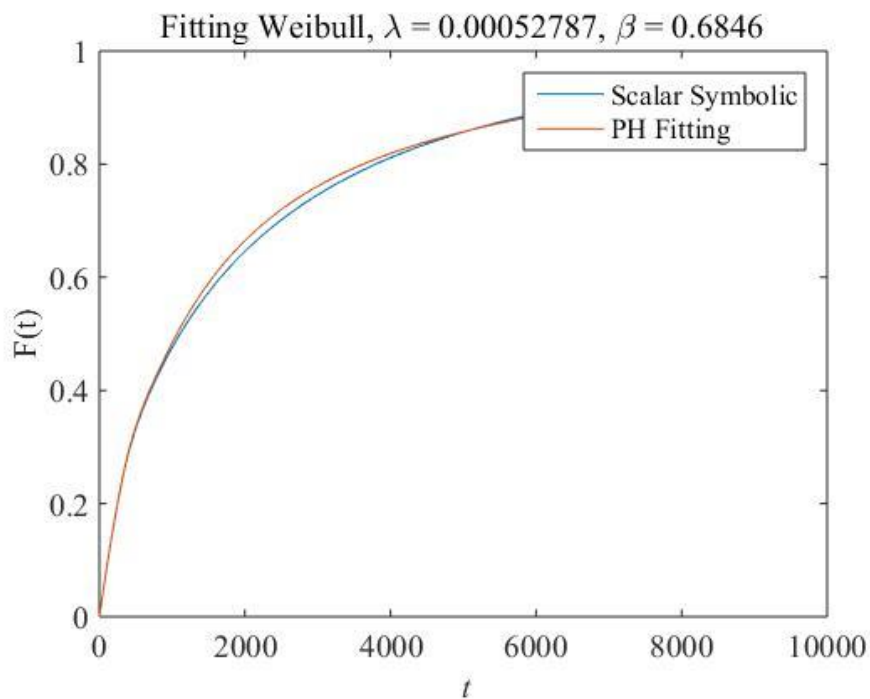
Gambar 5. Grafik CDF Hasil *Fitting* Distribusi *Weibull* Peralatan B22M303 ke Distribusi *Phase-Type*



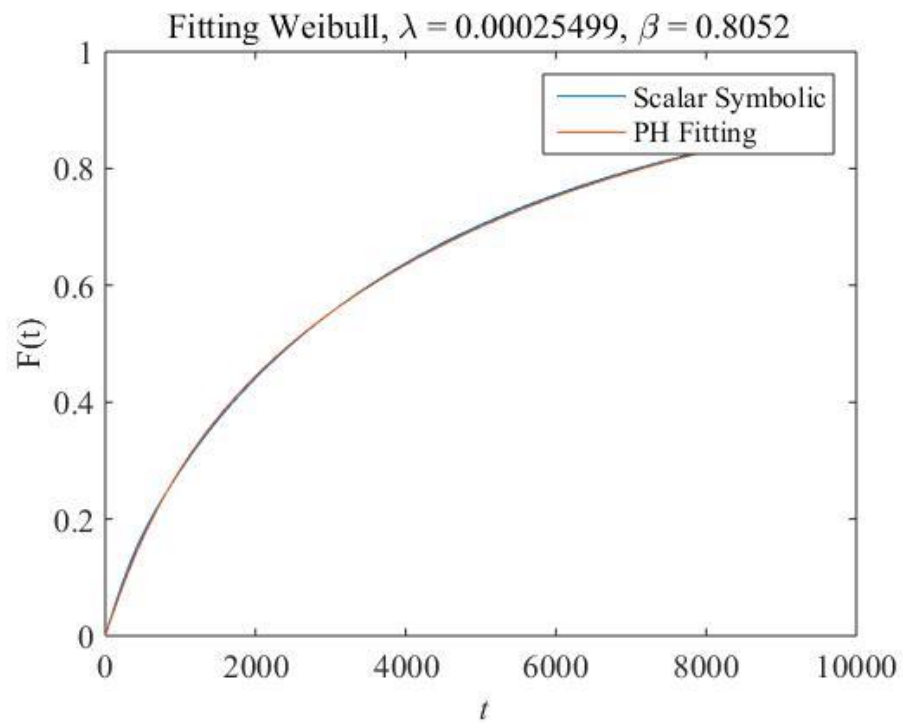
Gambar 6. Grafik CDF Hasil *Fitting* Distribusi *Weibull* Peralatan B26M310 ke Distribusi *Phase-Type*



Gambar 7. Grafik CDF Hasil *Fitting* Distribusi *Weibull* Peralatan B22M363 ke Distribusi *Phase-Type*



Gambar 8. Grafik CDF Hasil *Fitting* Distribusi *Weibull* Peralatan B26M364 ke Distribusi *Phase-Type*



Gambar 9. Grafik CDF Hasil *Fitting* Distribusi *Weibull* Peralatan B22M340 ke Distribusi *Phase-Type*

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## BIOGRAFI PENULIS



Penulis bernama lengkap Naurah Rafa, lahir di Jakarta, pada tanggal 29 September 1998. Penulis merupakan anak pertama dari empat bersaudara. Penulis telah menempuh Pendidikan formal di TK Nurul Islam, SDIT Nurul Fikri, SMPIT Alkahfi, dan SMAIT Nurul Fikri. Pada tahun 2016 penulis diterima sebagai mahasiswa di Departemen Teknik Sistem dan Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Selama masa perkuliahan penulis aktif dalam kegiatan organisasi mahasiswa diantaranya sebagai Staf Departemen Sosial Masyarakat BEM FTI ITS 2017/2018 dan Kepala Biro Pengabdian Masyarakat BEM FTI ITS 2018/2019. Selain itu penulis juga mengikuti beberapa pelatihan selama perkuliahan diantaranya yaitu, Latihan Keterampilan Manajemen Mahasiswa (LKMM) Pra-TD, LKMM TD, Latihan Keterampilan Manajemen Wirausaha (LKMW), dan ARENA *Training*. Dalam rangka pengaplikasian keilmuan Teknik Industri, penulis pernah melakukan Kerja Praktik di PT Pupuk Sriwidjaja Palembang di Departemen Perencanaan dan Pengendalian Produksi pada tahun 2019. Mata kuliah pilihan yang diambil penulis diantaranya adalah: Analisa Kapabilitas Proses, Ergonomi Makro, Klaster Industri, Manajemen Strategi, Pemodelan Sistem Berbasis Agen, dan Six Sigma. Penulis dapat dihubungi melalui *email* rafanaurah@gmail.com.