TUGAS AKHIR – TI 184833

ANALISIS KEANDALAN SISTEM PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA GAS PT PUPUK INDONESIA ENERGI DENGAN PENDEKATAN PHASE-TYPE DISTRIBUTION

SEKAR PUSPITA DEWI
NRP. 02411640000067

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

DEPARTEMEN TEKNIK DAN SISTEM INDUSTRI
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2020

TUGAS AKHIR – TI 184833

ANALISIS KEANDALAN SISTEM PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA GAS PT PUPUK INDONESIA ENERGI DENGAN PENDEKATAN *PHASE-TYPE DISTRIBUTION*

SEKAR PUSPITA DEWI
NRP 02411640000067

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

DEPARTEMEN TEKNIK DAN SISTEM INDUSTRI
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2020

FINAL PROJECT – TI 184833

SYSTEM RELIABILITY ANALYSIS OF GAS POWER PLANT SYSTEM PT PUPUK INDONESIA ENERGI USING PHASE TYPE DISTRIBUTION APPROACH

SEKAR PUSPITA DEWI
NRP 02411640000067

SUPERVISOR:
Stefanus Eko Wiratno, S.T., M.T.
NIP. 197103171998021001

DEPARTEMENTOF INDUSTRIAL SYSTEM AND ENGINEERING
Faculty of Industrial Technology and Engineering Systems
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2020

LEMBAR PENGESAHAN

ANALISIS KEANDALAN SISTEM PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA GAS PT PUPUK INDONESIA ENERGI DENGAN PENDEKATAN *PHASE TYPE DISTRIBUTION*

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:

SEKAR PUSPITA DEWI

NRP 02411640000067

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 PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA GAS PT PUPUK INDONESIA ENERGI DENGAN PENDEKATAN *PHASE-TYPE DISTRIBUTION*

Nama Mahasiswa : Sekar Puspita Dewi

NRP : 02411640000067

Pembimbing : Stefanus Eko Wiratno, ST., MT.

ABSTRAK

Penelitian ini membahas tentang analisis keandalan sistem pembangkit listrik tenaga gas PT Pupuk Indonesia Energi. Sistem pembangkit listrik tenaga gas PT Pupuk Indonesia Energi terdiri atas 4 subsistem utama yaitu *air compressor*, *combustor*, *turbine gas*, dan *power generator* yang terhubung secara seri. Penelitian ini dilakukan untuk melihat performansi keandalan sistem pada level 1 yaitu sistem pembangkit dan level 2 yaitu subsistem pembangkit. Metode yang digunakan dalam perhitungan keandalan sistem adalah *phase-type distribution* (distribusi PH). *Closure properties* dari distribusi PH digunakan untuk mendapatkan fungsi keandalan sistem dari masing-masing fungsi keandalan peralatan. Suatu fungsi keandalan akan memberikan informasi yang lengkap sehingga perhitungan keandalan sistem dapat dilakukan dengan lebih mudah. Hasil perhitungan keandalan sistem dengan pendekatan distribusi PH berupa fungsi keandalan sistem yang berdistribusi *phase-type*. Analisis sensitivitas dilakukan pada subsistem kritis dengan mempertimbangkan peralatan-peralatan kritis yang memiliki pengaruh besar dalam keandalan sistem. Hasil analisis dan perancangan skenario perbaikan sistem menunjukkan penerapan *standby redundancy* dengan *perfect switch* merupakan rekomendasi terbaik untuk meningkatkan keandalan sistem.

Kata kunci: Keandalan, Fungsi Keandalan Sistem, Blok Diagram Keandalan, Distribusi *Phase-Type*, Analisis Sensitivitas

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

SYSTEM RELIABILITY ANALYSIS OF GAS POWER PLANT SYSTEM PT PUPUK INDONESIA ENERGI USING PHASE TYPE DISTRIBUTION APPROACH

Nama Mahasiswa : Sekar Puspita Dewi

NRP : 02411640000067

Pembimbing : Stefanus Eko Wiratno, ST., MT.

ABSTRACT

This research discusses the reliability analysis of the gas power plant system at PT Pupuk Indonesia Energi. The gas power plant system at PT Pupuk Indonesia Energi consists of 4 main subsystems connected in series system, there are air compressor, combustor, turbine gas, and power generator. This research was conducted to see the reliability performance of the system at level 1 the generator system and level 2 the generator subsystem. The method used in calculating the reliability of the system is the phase-type distribution (PH distribution). The closure properties of the PH distribution are used to obtain the system reliability function of each equipment reliability function. A reliability function will provide complete information so that system reliability calculations can be done more easily. The results of system reliability calculations with the PH distribution approach are in the form of a system reliability function with a phase-type distribution. Sensitivity analysis is carried out on critical subsystems by considering critical equipment that has a big impact on system reliability. The results of the analysis and design of a system improvement scenario show that the implementation of standby redundancy with the perfect switch is the best recommendation to improve system reliability.

Keyword**:** *Reliability, System Reliability Function, Reliability Block Diagram, Phase-Type Distribution, Sensitivity Analysis*

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT atas limpahan rahmat, berkat, dan hidayah-Nya serta shalawat penulis lanturkan kepada junjungan Nabi Muhammad SAW sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul "Analisis Keandalan Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Gas PT Pupuk Indonesia Energi Dengan Pendekatan *Phase-Type Distribution*". Laporan Tugas Akhir ini disusun sebagai syarat untuk menyelesaikan studi strata 1 (S1) dan memperoleh gelar Sarjana di Teknik dan Sistem Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Selama proses pengerjaan Tugas Akhir, penulis telah menerima banyak dukungan, masukan, serta bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Kedua orang tua penulis, Bapak Subagiyo dan Ibu Suci Handayani atas segala dukungan, kasih sayang, ilmu yang telah diberikan, dan doa yang selalu beliau panjatkan. Serta satu-satunya adik penulis, Abimanyu Arya Nugraha yang juga memberikan dukungan dan doa atas kelancaran Tugas Akhir penulis.
2. Stefanus Eko Wiratno, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing penelitian Tugas Akhir. Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya atas waktu, bimbingan, petunjuk, motivasi, dan kesabaran dalam membimbing dan mengarahkan penulis sehingga penelitian Tugas Akhir dapat selesai tepat waktu.
3. Bapak Hanif dan Bapak Nizar selaku pembimbing eksternal yang telah meluangkan waktu untuk berdiskusi dan membantu penulis dalam mengumpulkan data penelitian Tugas Akhir.
4. Mochamad Nur Qomarudin, S.T., M.T. selaku pembimbing eksternal yang telah meluangkan waktu untuk berdiskusi dan membantu penulis dalam pengolahan data Tugas Akhir.
5. Prof. Dr. Ir. Budisantoso Wirjodirdjo, M.Eng, Nurhadi Siswanto, S.T., MSIE., Ph.D., Nani Kurniati, S.T, M.T., Ph.D, Niken Anggraini Savitri, S.T.,M.T selaku penguji seminar proposal dan sidang Tugas

Akhir yang telah memberikan kritik dan saran kepada penulis dalam menyelesaikan laporan Tugas Akhir.

6. Nurhadi Siswanto, S.T., MSIE., Ph. D., selaku kepala Departemen Teknik dan Sistem Industri ITS.
7. Seluruh Bapak dan Ibu Dosen Departemen Teknik dan Sistem Industri ITS yang telah mendidik dan mengajarkan banyak ilmu dan pelajaran kepada penulis selama masa perkuliahan.
8. Angkatan 2016 (ADHIGANA) yang selalu memberikan semangat sejak mahasiswa baru hingga masa perkuliahan berakhir.
9. Semua keluarga besar penulis, teman-teman penulis, dan pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu yang telah memberikan dukungan, motivasi, dan doa kepada penulis.

Penulis berharap laporan penelitian Tugas Akhir ini dapat memberikan banyak manfaat bagi seluruh pihak. Apabila terdapat kesalahan dan kekurangan, penulis memohon maaf yang sebesar-besarnya. Penulis sangat terbuka terhadap saran dan krtik apabila terdapat kesalahan dalam penulisan Tugas Akhir ini.

Jakarta, 30 Juli 2020

Sekar Puspita Dewi

DAFTAR ISI

ABSTRAK ..... **i**

ABSTRACT ..... **iii**

KATA PENGANTAR ..... **v**

DAFTAR ISI ..... **vii**

DAFTAR TABEL ..... **x**

DAFTAR GAMBAR ..... **xii**

BAB 1 PENDAHULUAN **1**

1.1 Latar Belakang Masalah 1

1.2 Perumusan Permasalahan 6

1.3 Tujuan 6

1.4 Manfaat 6

1.5 Ruang Lingkup Penelitian 6

1.5.1 Batasan 6

1.5.2 Asumsi 7

1.6 Sistematika Penulisan 7

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA **9**

2.1 Pemodelan Sistem 9

2.2 *Dependability* 10

2.3 Keandalan 12

2.4 *Reliability Block Diagram* 16

2.4.1 *Series System* 16

2.4.2 *Parallel System* 17

2.4.3 *K-Out-Of-N System* 19

2.5 *Phase-Type Distribution* 20

2.6 Operasi *Kronecker* 25

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN 29

3.1 Tahap Studi Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Gas 30

3.2 Tahap Pengumpulan Data 30

3.3 Tahap Pengolahan Data 31

3.3.1 Pengolahan Data Skalar 31

3.3.2 Pengolahan Data dengan Metode Distribusi *Phase-Type* 31

3.4 Validasi Hasil Perhitungan 31

3.5 Perancangan Skenario Perbaikan 31

3.6 Evaluasi Sistem Eksisting 32

3.7 Analisis dan Perbaikan Sistem 32

3.8 Kesimpulan dan Saran 32

BAB 4 PENGUMPULAN DAN PENGOLAHAN DATA 33

4.1 Deskripsi Sistem 33

4.2 Blok Diagram Keandalan 34

4.3 Rekap Data Hasil *Fitting* Distribusi 37

4.4 Pengolahan Data Metode Skalar 40

4.5 Pengolahan Data Metode *Phase-Type Distribution* 43

4.6 Penentuan Subsistem dan Peralatan Kritis dengan *Birnbaun Index* 52

BAB 5 ANALISIS KEANDALAN SISTEM DAN USULAN PERBAIKAN SISTEM 57

5.1 Analisis Keandalan Sistem Eksisting 57

5.2 Analisis Perbandingan MTTF dan CVTTF Sistem Eksisting 59

5.3 Analisis Sensitivitas 61

5.3.1 Pengaruh *Parallel Redundancy* terhadap Keandalan Sistem 62

5.3.2 Pengaruh *Standby Redundancy* dengan *Perfect Switch* terhadap Keandalan Sistem 62

5.3.3 Pengaruh Penggantian Peralatan 63
5.4 Perancangan dan Analisis Skenario Perbaikan 64
5.4.1 Skenario 1 Perbaikan Sistem 64
5.4.2 Skenario 2 Perbaikan Sistem 68
5.4.3 Skenario 3 Perbaikan Sistem 71
5.4.4 Analisis Skenario Perbaikan 73
BAB 6 KESIMPULAN DAN SARAN 77
6.1 Kesimpulan 77
6.2 Saran 78
DAFTAR PUSTAKA 79
DAFTAR LAMPIRAN 80
LAMPIRAN A 80
LAMPIRAN B 84
BIOGRAFI PENULIS 93

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1 Rekap Data Hasil *Fitting* Distribusi Data Kerusakan Peralatan..... 37
Tabel 4. 2 Tabel Formula Perhitungan Keandalan Metode Skalar..... 40
Tabel 4. 3 Rekap Hasil Perhitungan Keandalan Sistem pada *Compressor*..... 40
Tabel 4. 4 Rekap Hasil Perhitungan Keandalan Sistem pada *Combustor*..... 41
Tabel 4.5 Rekap Hasil Perhitungan Keandalan Sistem pada *Turbine Gas* 41
Tabel 4.6 Rekap Hasil Perhitungan Keandalan Sistem pada *Power Generator* ... 41
Tabel 4.7 Hasil Perhitungan Nilai Keandalan Sistem Kondisi Eksisting pada 42
Tabel 4.8 Rekap Representasi Distribusi PH pada Subsistem *Compressor*..... 43
Tabel 4.9 Rekap Nilai Representasi Distribusi PH pada Subsistem *Combustor*... 44
Tabel 4.10 Rekap Representasi Distribusi PH pada Subsistem *Turbine Gas* 45
Tabel 4.11 Rekap Representasi Distribusi PH pada Subsistem *Power Generator* 46
Tabel 4.12 Rekap Hasil Perhitungan Keandalan Sistem Metode Distribusi PH pada Subsistem *Compressor* 47
Tabel 4.13 Rekap Hasil Perhitungan Keandalan Sistem Distribusi PH pada *Combustor* 48
Tabel 4. 14 Rekap Hasil Perhitungan Keandalan Sistem Distribusi PH pada *Turbine Gas*..... 49
Tabel 4. 15 Rekap Hasil Perhitungan Keandalan Sistem Distribusi PH pada *Power Generator*..... 50
Tabel 4.16 Rekap Hasil Perhitungan Keandalan Sistem Eksisting Metode Distribusi PH pada $t = 8760$..... 51
Tabel 4. 17 Rekap Perhitungan q Komponen Kritis *Birnbaun Index* 52
Tabel 4. 18 Rekap Penentuan Subsistem Kritis dengan *Birnbaun Index*..... 53
Tabel 4.19 Rekap Penentuan Peralatan Kritis pada Subsistem *Air Compressor*... 54
Tabel 4.20 Rekap Penentuan Peralatan Kritis pada Subsistem *Turbine Gas*..... 54
Tabel 5.1 Rekap Perbandingan MTTF dan CVTTF Sistem Eksisting Metode Skalar dengan Metode Matriks (Distribusi PH) ……59
Tabel 5.2 Hasil Analisis Sensitivitas Pengaruh *Parallel Redundancy*..... 62
Tabel 5.3 Hasil Analisis Sensitivitas Pengaruh *Standby Redundancy Perfect Switch* 63

Tabel 5.4 Hasil Analisis Sensitivitas Pengaruh Penggantian Peralatan 63
Tabel 5.5 Rekap Hasil Perhitungan Keandalan Sistem dengan Skenario Perbaikan 1 ($t = 720$)..... 66
Tabel 5.6 Perbandingan Sistem Eksisting dengan Skenario 1 pada $t = 720$ 68
Tabel 5.7 Rekap Hasil Perhitungan Keandalan Sistem dengan Skenario Perbaikan 2 ($t = 720$)..... 69
Tabel 5.8 Perbandingan Sistem Eksisting dengan Skenario 2 pada $t = 720$ 70
Tabel 5.9 Rekap Hasil Perhitungan Keandalan Sistem dengan Skenario Perbaikan 3 ($t = 720$)..... 71
Tabel 5.10 Perbandingan Sistem Eksisting dengan Skenario 3 pada $t = 720$ 73
Tabel 5.11 Perbandingan Antara Sistem Eksisting dengan 3 Skenario Perbaikan pada $t = 8760$ jam 74

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Kebutuhan Listrik Pabrik Amurea II PKG tahun 2015 - 2019 1
Gambar 1. 2 Kebutuhan Listrik Pabrik Unit Batu Bara (UBB) PKG tahun 2015-2019 2
Gambar 1. 3 *Output rate* listrik PT Pupuk Indonesia Energi Periode 2015-2019 ... 2
Gambar 1. 4 Frekuensi *Downtime* Periode 2019 3
Gambar 2.1 *Dependability Tree* 11
Gambar 2.2 Kurva *Bathub* Laju Kegagalan 14
Gambar 2.3 *Series system* dengan n komponen 17
Gambar 2.4 RBD pada sistem *parallel*: (a) dua komponen; (b) n komponen 18
Gambar 2.5 *Two-out-of-three majority voting system* 19
Gambar 2.6 *Exponential Distribution Diagram* 22
Gambar 2.7 *Erlang Distribution Diagram* 23
Gambar 2. 8 *Hypo-Exponential Distribution Diagram* 23
Gambar 2.9 *Hyper-Exponential Distribution Diagram* 24
Gambar 2.10 Diagram Distribusi *Coxian* 25
Gambar 3.1 *Flowchart* Metodologi Penelitian… ….. 29
Gambar 4.1 *Process Flow Diagram* pada PT Pupuk Indonesia Energi…..... 33
Gambar 4.2 Blok Diagram Keandalan Proses Pembangkit Listrik Tenaga Gas ... 34
Gambar 4.3 Blok Diagram Keandalan pada Subsistem *Compressor* 35
Gambar 4.4 Blok Diagram Keandalan pada Subsistem *Combustor* 35
Gambar 4.5 Blok Diagram Keandalan pada Subsistem *Gas Turbine* 36
Gambar 4.6 Blok Diagram Keandalan pada Subsistem *Power Generator* 36
Gambar 4. 8 Blok Diagram Keandalan Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Gas .. 42
Gambar 4.9 Grafik CDF Hasil *Fitting* Distribusi Weibull Peralatan 01-LT-001-A ke Distribusi PH 44
Gambar 4.10 Grafik *Reliability Function* pada Subsistem *Compressor* 47
Gambar 4.11 Grafik *Reliability Function* pada Subsistem *Combustor* 48
Gambar 4.12 Grafik *Reliability Function* pada Subsistem *Turbine Gas* 49
Gambar 4.13 Grafik *Reliability Function* pada Subsistem *Power Generator* 50
Gambar 4.14 Grafik Keandalan Sistem Eksisting pada t = 0 hingga t = 8760 51

Gambar 4.15 Grafik Laju Kerusakan Eksisting pada t = 0 hingga t = 8760 52
Gambar 4.16 Hierarki Keandalan Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Gas 55
Gambar 5.1 Konfigurasi Struktur Perbaikan 1 Pada *Air Compressor* ……..64
Gambar 5.2 Konfigurasi Struktur Perbaikan 1 Pada *Turbine Gas* 64
Gambar 5.3 Grafik Keandalan Sistem dengan Skenario Perbaikan 1 dengan $t = 720$ 66
Gambar 5.4 Grafik Laju Kerusakan Sistem dengan Skenario Perbaikan 1 pada $t = 720$ 67
Gambar 5.5 Grafik Keandalan Sistem dengan Skenario Perbaikan 2 dengan $t = 720$ 69
Gambar 5.6 Grafik Laju Kerusakan Sistem dengan Skenario Perbaikan 2 pada $t = 720$ 70
Gambar 5.7 Grafik Keandalan Sistem dengan Skenario Perbaikan 3 dengan $t = 720$ 72
Gambar 5.8 Grafik Laju Kerusakan Sistem dengan Skenario Perbaikan 3 pada $t = 720$ 72
Gambar 5.9 Perbandingan Grafik Keandalan Sistem Eksisting dengan Ketiga Skenario Perbaikan pada $t = 8760$. 74

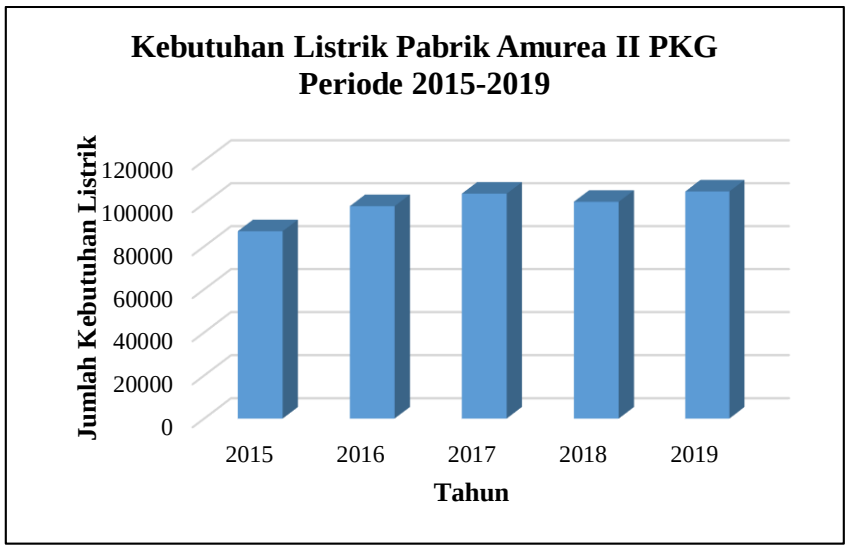
BAB 1

PENDAHULUAN

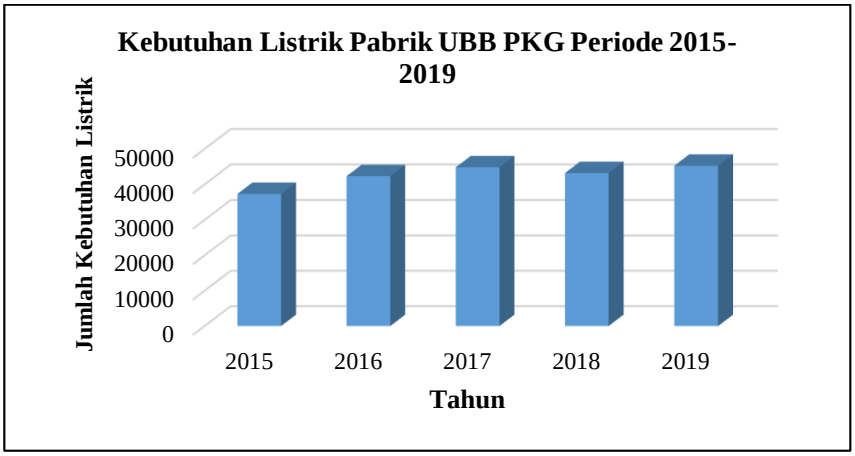
Pada bab ini akan dijelaskan mengenai latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, ruang lingkup penelitian yang mencakup batasan dan asumsi, serta sistematika penulisan yang digunakan dalam penelitian.

1.1 Latar Belakang Masalah

Listrik merupakan suatu hal yang vital dan strategis dalam menunjang segala kebutuhan manusia. Listrik tidak hanya digunakan untuk kebutuhan rumah tangga, namun juga digunakan untuk mendukung kegiatan industri. Berikut merupakan grafik dari kebutuhan listrik Pabrik Amurea II dan Pabrik Unit Batu Bara (UBB) PT Petrokimia Gresik tahun 2015-2019.

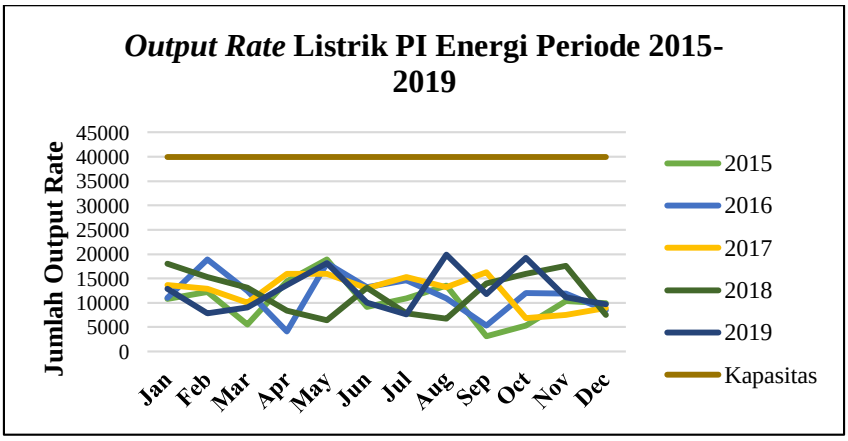


Gambar 1.1 Kebutuhan Listrik Pabrik Amurea II PKG tahun 2015 - 2019
Sumber: PT Pupuk Indonesia Energi (2020)



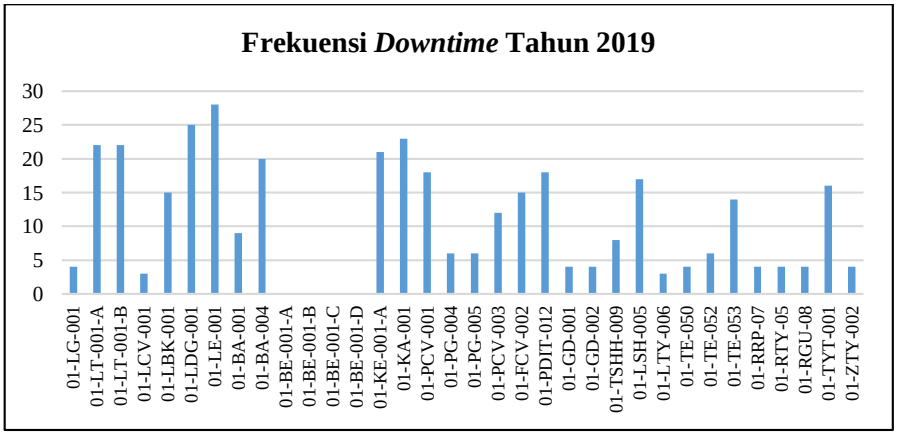
Gambar 1. 2 Kebutuhan Listrik Pabrik Unit Batu Bara (UBB) PKG tahun 2015-2019
Sumber: PT Pupuk Indonesia Energi (2020)

Berdasarkan grafik pada Gambar 1.1 dan Gambar 1.2, diketahui bahwa kebutuhan listrik yang harus dialirkan oleh PT Pupuk Indonesia Energi ke Pabrik Amurea II dan Pabrik Unit Batu Bara PKG mengalami peningkatan setiap tahunnya. PT Pupuk Indonesia Energi merupakan salah satu anak usaha Pupuk Indonesia *Holding Company* (PIHC) yang didirikan pada tanggal 18 Agustus 2014. PT Pupuk Indonesia Energi didirikan untuk mensuplai energi listrik dan *steam* ke perusahaan-perusahaan di lingkungan kelompok usaha PIHC, seperti PT Petrokimia Gresik (PKG) yang tengah mengembangkan fasilitas produksi terbaru yaitu Pabrik Amurea II dan Pabrik Unit Batu Bara (UBB). Listrik merupakan salah satu *output* yang dihasilkan oleh PT Pupuk Indonesia Energi. Gambar 1.3 merupakan *output rate* listrik pada PT Pupuk Indonesia Energi periode 2015-2019.



Gambar 1. 3 *Output rate* listrik PT Pupuk Indonesia Energi Periode 2015-2019
Sumber: PT Pupuk Indonesia Energi (2020)

Untuk mencapai visi perusahaan yaitu menjadi perusahaan energi dan utilitas terintegrasi yang berskala nasional untuk menunjang bisnis utama PIHC, maka diperlukan peningkatan keandalan sistem pembangkit listrik dengan mempertimbangkan keandalan dari setiap peralatan penyusunnya. PT Pupuk Indonesia Energi merupakan pembangkit listrik dan *steam* dengan siklus tertutup dan berlangsung secara kontinyu. Siklus tertutup disebabkan gas buang dari gas turbin akan dimanfaatkan dalam proses pembangkit listrik tenaga uap (*Heat Recovery Steam Generator*). Industri dengan proses kontinyu akan mengalami kerugian yang cukup besar bila proses produksinya berhenti tanpa direncanakan. Salah satu faktor yang menyebabkan industri proses kontinyu berhenti tanpa direncanakan adalah adanya kerusakan peralatan yang disebabkan oleh penurunan keandalan peralatan akibat digunakan secara kontinyu. Gambar 1.4 merupakan grafik frekuensi *downtime* yang terjadi pada PT Pupuk Indonesia Energi periode 2017 hingga 2019.



Gambar 1. 4 Frekuensi *Downtime* Periode 2019
Sumber: PT Pupuk Indonesia Energi (2020)

Berdasarkan Gambar 1.4 diketahui bahwa sistem pembangkit listrik tenaga gas pada PT Pupuk Indonesia Energi sering mengalami *downtime*, terutama pada peralatan 01-LE-001 yang merupakan salah satu peralatan pada subsistem *air compressor*. Dalam beberapa tahun terakhir, keandalan menjadi masalah yang krusial karena semakin meningkatnya kecanggihan sistem rekayasa modern, sehingga menyebabkan peningkatan terhadap kerentanan terjadinya kesalahan (Pansoo, 2017). Oleh karena itu dibutuhkan peralatan-peralatan yang memiliki

keandalan tinggi sebagai penunjang utama proses pembangkit listrik tenaga gas. Elsayed (2012) mendefinisikan keandalan sebagai probabilitas dari suatu produk atau *service* mampu bekerja dengan tepat dalam periode waktu tertentu (*design life*) dan kondisi operasi tertentu (seperti *temperature*, *load*, dan lainnya). Keandalan juga dapat digunakan sebagai sebuah pengukuran untuk sistem mampu berhasil bekerja sesuai dengan fungsi dan waktu yang telah ditentukan (Dhillon, 2006).

Analisis keandalan sistem perlu dilakukan untuk mengetahui keandalan dari masing-masing subsistem penyusunnya dan pengaruh subsistem tersebut terhadap keandalan sistem. Selain itu, analisis keandalan sistem juga mampu membantu perusahaan untuk mengetahui informasi yang dapat membantu meningkatkan keandalan sistem tersebut. Perhitungan dalam suatu analisis keandalan sistem dapat dilakukan dengan menggunakan distribusi kerusakan dari masing-masing peralatan penyusunnya. Analisis keandalan sistem dapat dilakukan dengan mudah dan lengkap apabila diketahui fungsi keandalan sistem tersebut dibandingkan dengan hanya mengetahui nilai keandalan sistem saja. Dhillon (2006) menyatakan bahwa nilai keandalan dari suatu peralatan atau sistem akan mengalami perubahan seiring dengan adanya perubahan waktu. Perubahan nilai ini mengikuti pola *bathub curve*, terdiri atas *decreasing failure rate* (DFR), *constant failure rate* (CFR), dan *increasing failure rate* (IFR). Perubahan nilai keandalan dapat disebabkan oleh adanya penuaan (*aging*) dan deteriorasi. Lain halnya dengan nilai keandalan, suatu fungsi keandalan tidak berubah seiring dengan perubahan waktu selama parameter dari fungsi tersebut tidak berubah. Selain itu, setiap peralatan dalam suatu sistem juga memiliki fungsi keandalan dengan distribusi yang berbeda satu dengan lainnya.

Alkaff dan Qomarudin (2020) menyatakan bahwa *mathematical expression* fungsi keandalan dari suatu sistem adalah hal yang sulit untuk dilakukan secara tradisional, terutama ketika fungsi keandalan dari komponen-komponen dalam sistem tersebut adalah campuran atau konvolusi dari beberapa fungsi keandalan. Contohnya, jika dalam suatu sistem terdapat tiga komponen, dimana komponen A mengikuti pola distribusi *Weibull*, komponen B mengikuti pola distribusi Lognormal, dan komponen C mengikuti pola distribusi eksponensial, maka perhitungan nilai keandalan dari sistem tersebut sulit dilakukan. Oleh karena

hal tersebut, maka dibutuhkan suatu distribusi yang mampu menghasilkan *mathematical expression* dari fungsi keandalan suatu sistem dimana fungsi keandalan pada komponen-komponennya adalah campuran atau konvolusi. Ketika fungsi keandalan sistem tersebut diperoleh, maka *reliability measures* seperti *hazard function* dan *mean time to failure* dapat diperoleh secara efisien hanya dengan menggunakan matriks aljabar (Alkaff & Qomarudin, 2020).

Penelitian ini menggunakan *phase-type distribution* (distribusi PH) sebagai distribusi yang digunakan untuk melakukan analisis keandalan pada sistem pembangkit listrik tena gas pada PT Pupuk Indonesia Energi. *Phase-type distribution* adalah suatu distribusi waktu yang dibutuhkan X untuk masuk ke dalam *absorbing state* dari transisi *state* pada sebuah *absorbing continuous time Markov process* (Buchholz, et al., 2014). Distribusi PH dapat digunakan untuk model keandalan dalam menentukan *lifetime* suatu sistem (Alkaff & Qomarudin, 2020). Distribusi PH membantu dalam merancang algoritma untuk menghasilkan fungsi keandalan dengan *basic structures* secara lebih efisien. *Basic structures* yang dimaksud mencakup seri, paralel, *k-out-of-N*, dan *standby structures* dengan *perfect switch* atau *imperfect switch*. Algoritma yang telah dirancang tersebut akan membentuk sebuah pemodelan keandalan sistem berdasarkan hubungan antara *lifetime* dari suatu sistem dan *lifetime* dari komponen. Distribusi PH mampu meningkatkan fleksibilitas dan kepraktisan dalam analisis keandalan sistem karena mampu mendekati dengan baik distribusi acak dan dapat mewakili semua distribusi pada bilangan bulat non-negatif (Pansoo, 2017). Metode distribusi PH ini cocok digunakan dalam analisis keandalan karena mampu menghasilkan fungsi keandalan sistem tersebut.

Fungsi keandalan sistem akan memberikan informasi yang lengkap pada analisis keandalan sistem sehingga peningkatan terhadap keandalan sistem dapat dilakukan dengan lebih mudah. Peningkatan keandalan sistem yang dilakukan secara optimal diharapkan mampu meningkatkan keandalan sistem pembangkit listrik tenaga gas sehingga dapat membantu menunjang bisnis utama Pupuk Indonesia *Holding Company* (PIHC).

1.2 Perumusan Permasalahan

Penelitian ini membahas analisis keandalan sistem pembangkit listrik pada PT Pupuk Indonesia Energi dengan menggunakan pendekatan *phase-type distribution* untuk meningkatkan keandalan sistem pembangkit listrik dengan mempertimbangkan keandalan pada setiap subsistem penyusunnya.

1.3 Tujuan

Tujuan penelitian ini sebagai berikut.

1. Melakukan identifikasi sistem eksisting perusahaan terkait dengan keandalan sistem pembangkit listrik tenaga gas pada PT Pupuk Indonesia Energi.
2. Melakukan perhitungan keandalan sistem pembangkit listrik tenaga gas PT Pupuk Indonesia Energi dengan model keandalan sistem yang menggunakan metode *phase-type distribution* dan metode skalar.
3. Melakukan analisis sensitivitas untuk memberikan alternatif skenario dalam peningkatan keandalan sistem pembangkit listrik tenaga gas.

1.4 Manfaat

Manfaat yang diperoleh dari penelitian ini adalah:

1. Perusahaan mendapatkan informasi mengenai performansi keandalan sistem pembangkit listrik tenaga gas.
2. Perusahaan memperoleh informasi terkait dengan bagaimana meningkatkan keandalan sistem pembangkit listrik dengan mempertimbangkan keandalan dari masing-masing subsistem penyusunnya.

1.5 Ruang Lingkup Penelitian

Batasan dan asumsi yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

1.5.1 Batasan

Batasan yang digunakan dalam penelitian ini sebagai berikut:

1. Penelitian ini tidak mempertimbangkan faktor biaya dalam peningkatan keandalan sistem.

2. Penelitian ini tidak mempertimbangkan peralatan yang digunakan dalam proses pembangkit *steam*.
3. Penelitian ini hanya dibatasi pada level 1 yaitu sistem pembangkit dan level 2 yaitu subsistem pembangkit.
4. Penelitian ini hanya mempertimbangkan *rotating equipment* yang digunakan dalam proses pembangkit listrik. Peralatan *non-rotating equipment* seperti pipa, tanki, dan lainnya tidak diikutsertakan dalam perhitungan keandalan sistem karena memiliki keandalan tinggi dan *lifetime* panjang sehingga tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap keandalan sistem.

1.5.2 Asumsi

Asumsi yang digunakan dalam penelitian ini sebagai berikut:

1. Kerusakan pada peralatan bukan disebabkan oleh kesalahan manusia (*human error*).
2. Pada usulan perbaikan dengan penerapan *standby redundancy*, *fault detection* dan *switching device* struktur peralatan adalah *perfect*.

1.6 Sistematika Penulisan

Pada subbab ini akan dijelaskan mengenai sistematika penulisan yang terdapat dalam penelitian ini. Adapun sistematika penulisan dalam penelitian ini terdiri atas beberapa bab sebagai berikut.

BAB 1: PENDAHULUAN

Bab ini menjelaskan mengenai latar belakang dari dilakukannya penelitian Tugas Akhir, perumusan masalah yang menjadi dasar pada latar belakang, tujuan penelitian yang ingin dicapai, manfaat penelitian yang diharapkan, ruang lingkup penelitian yang terdiri atas batasan dan asumsi yang digunakan dalam penelitian, serta sistematika penulisan laporan penelitian ini.

BAB 2: TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini menjelaskan mengenai tinjauan pustaka yang berisi atas teori-teori yang digunakan sebagai dasar referensi dalam pengerjaan penelitian ini. Tinjauan

pustaka ini berasal dari buku, jurnal, maupun sumber lainnya yang dapat dipercaya sebagai referensi pengerjaan penelitian. Adapun pada tinjauan pustaka dalam penelitian ini terdiri atas pemodelan sistem, *dependability*, keandalan, *reliability block diagram*, *phase-type distribution*, dan operasi *Kronecker*.

BAB 3: METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini menjelaskan mengenai metodologi penelitian yang berupa tahapan-tahapan yang dilakukan dalam penelitian. Tahapan tersebut antara lain tahap studi sistem proses pembangkit listrik tenaga gas pada PT Pupuk Indonesia Energi, tahap pengumpulan data, tahap pengolahan data, tahap validasi data, tahap perancangan skenario perbaikan, tahap evaluasi sistem eksisting, tahap analisis dan perbaikan sistem, serta tahap kesimpulan dan saran.

BAB 4: PENGUMPULAN DAN PENGOLAHAN DATA

Bab ini menjelaskan mengenai pengumpulan dan pengolahan data yang meliputi deskripsi sistem, pembuatan model struktural yaitu *reliability block diagram*, rekap data hasil *fitting* distribusi, perhitungan nilai keandalan sistem secara konvensional, perhitungan nilai keandalan sistem dengan metode distribusi PH, dan penentuan subsistem kritis dengan metode *Birnbaun Index*.

BAB 5: ANALISIS SISTEM EKSISTING DAN USULAN PERBAIKAN SISTEM

Bab ini menjelaskan analisis terhadap keandalan sistem pembangkit listrik tenaga gas kondisi eksisting sesuai dengan hasil pengolahan data pada bab sebelumnya. Selain itu dilakukan pula analisis perbandingan nilai MTTF dan CVTTF pada kondisi eksisting, analisis sensitivitas untuk melihat pengaruh konfigurasi struktur sistem (*redundancy*) dan pengaruh penggantian peralatan terhadap keandalan sistem, serta perancangan dan analisis skenario perbaikan.

BAB 6: KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini menjelaskan mengenai penarikan kesimpulan dari hasil penelitian yang telah diperoleh sebagai tujuan dari penelitian. Selain itu, bab ini juga menjelaskan mengenai saran yang diberikan sebagai rekomendasi untuk penelitian selanjutnya.

BAB 2
TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini akan dijelaskan mengenai teori-teori yang menjadi dasar landasan dalam melakukan penelitian, diantaranya pemodelan sistem, keandalan, *reliability block diagram*, *phase-type distribution*, dan operasi Kronecker.

2.1 Pemodelan Sistem

Sistem adalah gabungan dari beberapa elemen independen yang saling berinteraksi satu sama lain dan memiliki tujuan tertentu (Daellenbach, et al., 2012). Sistem terdiri atas beberapa hal yang krusial, seperti elemen, hubungan antar elemen, perilaku atau aktivitas dalam sistem, hubungan dengan lingkungan, *input* dari lingkungan, *output* untuk lingkungan, dan ketertarikan khusus dari observer. Setiap elemen memiliki kontribusi dalam membentuk perilaku sistem, dimana jika ada komponen yang berubah, maka perilaku sistem turut berubah. Perilaku sistem terdiri atas proses tranformasi, yaitu transformasi *input* dari lingkungan menjadi suatu *output*. Sistem juga memiliki batasan (*system boundary*), dimana *system boundary* adalah batasan antara sistem dengan lingkungan. Proses pemilihan batasan (*boundary*) merupakan suatu aspek yang perlu diperhatikan dalam sebuah pemikiran secara sistem. Daellenbach, et al (2012) menyatakan bahwa *system boundary* tidak hanya melihat bagaimana proses transformasi pada sistem dan bentuk dari *output*, namun juga melihat siapa yang akan memperoleh keuntungan dari *output* yang diharapkan dan siapa yang akan memperoleh kerugian dari konsekuensi yang tidak diharapkan.

Sedangkan, model adalah representasi dari sistem aktual yang mampu menggambarkan hubungan interaksi dari berbagai faktor yang diamati. Karakteristik model yang baik adalah model yang dapat mudah dipahami, mampu merepresentasikan seluruh aspek signifikan dalam suatu masalah yang dapat berpengaruh pada ukuran kinerja (*complete*), komunikatif, dan mudah menyesuaikan jika terdapat perubahan *input* (Daellenbach, et al., 2012).

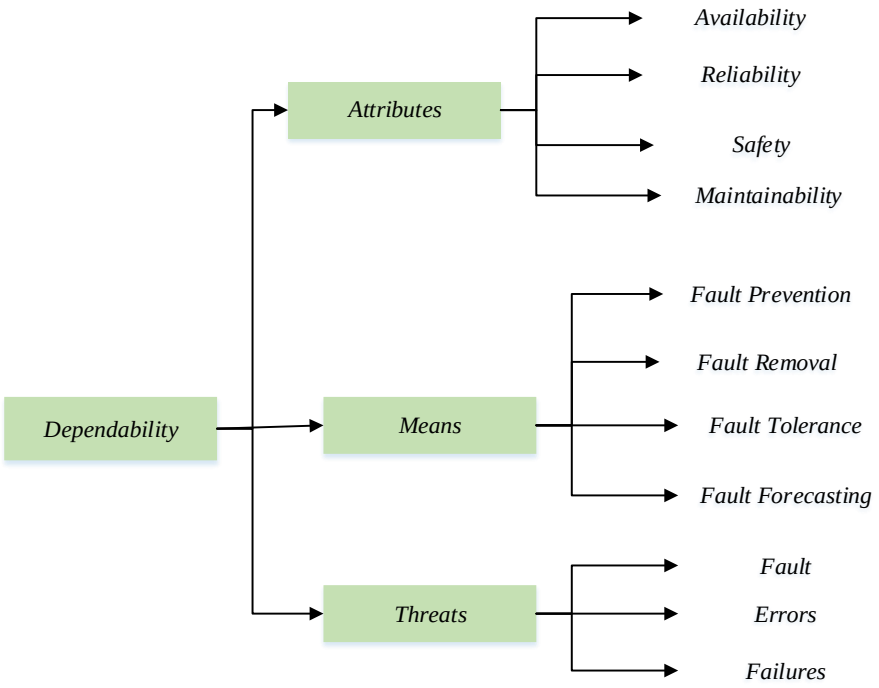
Sistem dapat dipahami atau dilakukan perubahan secara langsung jika tidak memiliki konsekuensi yang besar atas hasil perubahan tersebut. Namun, jika hasil perubahan dari sistem tersebut memiliki konsekuensi yang besar, perubahan

pada sistem dapat dilakukan dengan membuat model untuk proses evaluasi terlebih dahulu. Dalam suatu permasalahan, terdapat enam elemen dari suatu masalah antara lain *decision maker*, tujuan atau *objective*, kriteria keputusan (*decision criteria*), *performance measure*, proses kontrol input atau tindakan alternatif, dan konteks dari permasalahan tersebut (Daellenbach, et al., 2012).

Salah satu bagian penting dalam pemodelan adalah proses pengumpulan data. Harrel, et al (2000) menyatakan bahwa terdapat enam langkah dalam proses pengumpulan data, yaitu menentukan kebutuhan data, mengidentifikasi sumber data, mengumpulkan data, membuat asumsi jika dibutuhkan, menganalisis data, serta mendokumentasikan data. Terdapat tiga kategori data yang dibutuhkan yaitu data struktural, data operasional, dan data numerik. Data struktural merupakan data yang memberikan informasi tentang suatu konfigurasi struktur atau *layout* dari sistem yang akan dimodelkan. Data operasional adalah data yang memberikan informasi tentang bagaimana suatu sistem beroperasi, seperti *process flow diagram*. Data numerik merupakan data yang memberikan informasi kuantitatif dalam suatu sistem. Suatu data dapat dikumpulkan dari berbagai sumber, seperti observasi langsung, wawancara, catatan historis, *benchmark* dengan sistem yang sejenis, data dari vendor, dan literature penelitian. Data juga dapat diperoleh dari orang-orang yang memiliki keahlian dalam beberapa aspek sistem yang dimodelkan.

2.2 *Dependability*

Dependability adalah sebuah payung yang mencakup beberapa atribut seperti keandalan, ketersediaan, keamanan, *integrity*, dan *maintainability* (Trivedi & Bobbio, 2017). Trivedi & Bobbio (2017) menyatakan bahwa *dependability* adalah kemampuan suatu item dalam memenuhi spesifikasi desain dan ekspektasi dari pengguna item tersebut. Tingkat untuk mengetahui kemampuan item tersebut mampu mencapai ekspektasi yang telah ditetapkan menjadi hal yang penting dalam berbagai proses, seperti proses perancangan, proses perencanaan, implementasi, validasi, *manufacturing*, dan operasi lapangan (*field operation*). Berikut merupakan *dependability tree* menurut Trivedi & Bobbio (2017).



Gambar 2.1 *Dependability Tree*
Sumber: (Trivedi & Bobbio, 2017)

Berdasarkan Gambar 2.1, *dependability* terbagi menjadi tiga kategori, antara lain:

a. *Attributes*: Atribut pada *dependability* sendiri terbagi menjadi empat kategori, yaitu:
   - *Reliability* adalah probabilitas suatu item untuk menunjukkan kemampuan suatu item tersebut dapat berfungsi sesuai dengan yang diharapkan dalam kondisi tertentu dan periode waktu tertentu (Dhillon, 2006)
   - *Availability* adalah probabilitas dari suatu item untuk selalu tersedia digunakan saat dibutuhkan (Dhillon, 2006)
   - *Safety* adalah kondisi dari suatu item untuk aman bagi pengguna item tersebut saat item tersebut digunakan.
   - *Maintainability* adalah probabilitas dari suatu item yang mengalami kegagalan atau kerusakan akan diperbaiki untuk kembali mencapai kondisi operasional yang normal (Dhillon, 2006)
b. *Means*: Cara untuk mencapai atau memastikan *dependability* pada suatu item yang terbagi menjadi empat kategori, yaitu:

- *Fault Prevention* (*fault avoidance*) berkaitan dengan perancangan suatu sistem dengan sangat hati-hati untuk meminimalisir terjadinya kesalahan (*faults*)
- *Fault Removal* adalah proses untuk menemukan dan memperbaiki kesalahan selama proses pengujian atau proses operasi
- *Fault Tolerance* adalah suatu rangkaian teknik yang memungkinkan sistem secara keseluruhan untuk terus berfungsi terlepas dari kegagalan pada komponen atau sub-sistem. Penggunaan redundansi dan manajemen redundansi menjadi hal yang penting pada *fault tolerance*. Manajemen redundansi sendiri termasuk deteksi, lokasi, rekonfigurasi, dan proses pemulihan.
- *Fault Forecasting* berkaitan dengan metode untuk memprediksi kejadian dari *faults* atau *errors* atau *failures*.

c. *Threats*: Ancaman atau hambatan dalam *dependability* ini terbagi menjadi tiga kategori, antara lain sebagai berikut:
   - *Faults* adalah kesalahan yang mampu menyebabkan *errors* dan *failures*. Suatu kesalahan dapat menyebabkan *internal errors*.
   - *Errros* adalah akumulasi dari kesalahan-kesalahan yang telah terjadi dan dapat menyebabkan *failure*.
   - *Failures* adalah akumulasi dari *faults* dan *errors* yang telah terjadi. *Failure* pada suatu sub-sistem dapat menjadi sebuah kesalahan pada level sistem.

2.3 Keandalan

Keberhasilan dari suatu proses pembangkit juga dipengaruhi oleh aspek keandalan, baik keandalan peralatan, keandalan subsistem, keandalan sistem yang tidak mengalami kegagalan dalam jangka waktu tertentu. Dalam arti luas, keandalan dikaitkan dengan *dependability*, dengan operasi yang sukses dan dengan tidak adanya kerusakan (Lewis, 1994). Namun demikian, *engineering analyst* perlu mendefinisikan keandalan secara kuantitatif sebagai suatu probabilitas. Menurut Lewis (1994), keandalan didefinisikan sebagai probabilitas bahwa suatu sistem

akan melakukan fungsi tertentu dalam periode waktu tertentu di bawah serangkaian kondisi tertentu.

Keandalan adalah probabilitas dari sebuah item mampu beroperasi sesuai dengan kondisi yang diharapkan untuk kondisi dan periode waktu tertentu (Dhillon, 2006). Elsayed (2012) mendefinisikan keandalan sebagai probabilitas dari suatu produk atau *service* mampu bekerja dengan tepat dalam periode waktu tertentu dan kondisi operasi tertentu (seperti *temperature*, *volt*, dan lainnya). Dengan kata lain, keandalan dapat digunakan sebagai sebuah pengukuran untuk sistem mampu berhasil bekerja sesuai dengan fungsi dan waktu yang telah ditentukan.

Jika n_0 adalah total komponen yang tersedia dalam suatu kondisi operasi, $(t - \Delta t, t)$ adalah interval waktu, $n_f(t)$ adalah komponen yang gagal dalam suatu kondisi operasi, dan $n_s(t)$ adalah komponen yang masih bertahan dalam suatu kondisi operasi tertentu, maka keandalan pada waktu $t$adalah:

$$R_{(t)} = \frac{n_s(t)}{n_s(t) + n_f(t)} = \frac{n_s(t)}{n_0} \quad (1)$$

Jika T adalah *random variable* dari *time to failure* (TTF), maka keandalan pada waktu t adalah:

$$R_{(t)} = P\{x(t) = 1\} = P(T > t) \quad (2)$$

Maka persamaan *cumulative distribution function* (CDF) sebagai berikut:

$$R_{(t)} + F_{(t)} = 1 \quad (3)$$

Sedangkan persamaan *probability density function* (PDF) sebagai berikut:

$$R_{(t)} + F_{(t)} = 1$$

$$\int_t^\infty f_{(t)}\, dt + \int_0^t f_{(t)}\, dt = \int_0^\infty f_{(t)}\, dt$$

$$R_{(t)} = \int_0^\infty f_{(t)}\, dt$$

$$R_{(t)} = 1 - F_{(t)}$$

$$R_{(t)} = 1 - \int_0^t f_{(t)}\, dt$$

$$\frac{dR_{(t)}}{dt} = \frac{1}{dt} - f_{(t)}$$

$$f_{(t)} = -\frac{dR_{(t)}}{dt} \quad (4)$$

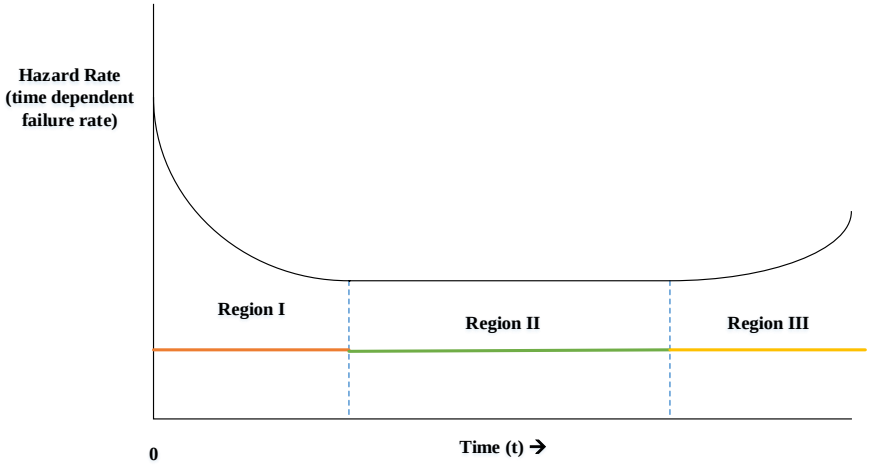
Dimana t adalah waktu, $f_{(t)}$ adalah *failure* atau *probability density function* dan $R_{(t)}$ adalah keandalan suatu item pada waktu t. Sementara itu, *hazard rate* atau *hazard function* adalah probabilitas kegagalan yang terjadi pada interval t hingga $(t + dt)$. Adapun persamaan *hazard rate* $(h_{(t)})$ adalah:

$$h_{(t)} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{R_{(t)} - R_{(t+\Delta t)}}{\Delta \mathrm{t}\, R_{(t)}}$$

$$h_{(t)} = \frac{1}{R_{(t)}} \left[-\frac{d}{dt} R_{(t)} \right]$$

$$h_{(t)} = \frac{f_{(t)}}{R_{(t)}} \qquad (5)$$

Konsep *bathub hazard rate* berfungsi untuk merepresentasikan berbagai perilaku dari sebuah kegagalan yang disebabkan oleh laju kegagalan yang berubah seiring dengan berjalannya waktu (Dhillon, 2006). Gambar 2.2 berikut ini merupakan kurva dari *bathub hazard rate*.



Gambar 2.2 Kurva *Bathub* Laju Kegagalan
Sumber: (Dhillon, 2006)

Berdasarkan Gambar 2.2, diketahui bahwa *bathub hazard rate* dibagi menjadi tiga daerah, yaitu daerah I, daerah II, dan daerah III. Daerah I adalah periode permulaan beroperasinya suatu komponen atau sistem yang masih baru. Daerah I dikenal dengan *decreasing failure rate* (DFR) atau *burn-in period*. Selama periode daerah I laju kerusakan dari suatu item mengalami penurunan seiring bertambahnya waktu. Hal ini disebabkan oleh beberapa hal seperti: kesalahan

manusia, kurangnya pengendalian kualitas, kurangnya proses, kurangnya pengecekan *error*, dan kualitas bahan material yang dibawah standar.

Daerah II dikenal dengan *constant failure rate* (CFR) atau *useful life period*. Selama periode daerah II *hazard rate* dari suatu item adalah konstan. Hal ini disebabkan oleh beberapa faktor seperti: *defects* yang tidak terdeteksi, kesalahan manusia, *natural failures*, adanya tekanan yang lebih tinggi. Daerah II merupakan periode dimana sebagian besar umur pakai komponen atau sistem berada. Dalam analisis, tingkat keandalan sistem diasumsikan berada pada periode *useful lifetime*, dimana *failure rate* nya konstan terhadap waktu.

Daerah III dikenal dengan *increasing failure rate* (IFR) atau *wear-out period*. Selama periode daerah III *hazard rate* dari suatu item mengalami kenaikan yang disebabkan oleh beberapa faktor seperti: kurangnya perawatan, korosi, penuaan, proses mendesain yang singkat. Periode pada daerah III berakhir saat keandalan komponen atau sistem mendekati nol, dimana kerusakan yang terjadi sudah sangat parah dan tidak dapat diperbaiki kembali. Cara untuk meminimalisir dampak pada *wear-out period* adalah dengan melakukan *preventive maintenance* secara periodik dan mempertimbangkan adanya penggantian produk.

Secara matematis *bathub hazard rate curve* direpresentasikan dengan persamaan berikut:

$$\lambda_{(t)} = \theta\lambda\beta t^{\beta-1} + (1-\theta)\, bt^{b-1}\alpha e^{\alpha t^{b}} \qquad (6)$$

untuk $\beta, b, \lambda,$ dan $\alpha > 0; 0 \leq \theta \leq 1;\ \beta = 0.5, b = 1, dan\ t \geq 0,$ dimana t adalah waktu, $\lambda_{(t)}$ adalah *hazard rate*, α dan λ adalah *scale parameters* sedangkan β dan b adalah *shape parameters*.

Keandalan tidak hanya tentang dengan probabilitas kegagalan (*probability of failure*) tetapi juga konsekuensi potensial dari berbagai mode kegagalan (*failure modes*). Karakteristik keandalan suatu sistem dapat dilihat dari *mean time to failure* (MTTF), *failure rate*, *availability*, dan *mean time to repair* (Lewis, 1994).

MTTF adalah salah satu pengukuran untuk keandalan yang paling sering digunakan. $E[T]$ adalah *expected* atau rata-rata dari waktu kerusakan T, sehingga persamaan untuk *mean time to failure* (MTTF) sebagai berikut:

$$f_{(t)} = -\frac{dR_{(t)}}{dt}$$

$$MTTF = -\int_0^{\infty} t\frac{dR_{(t)}}{dt}dt$$

$$MTTF = -tR_{(t)}\Big|_0^{\infty} + \int_0^{\infty} R_{(t)}\,dt$$

Karena $tR_{(t)} \to 0,\ t \to 0, dan\ tR_{(t)} \to 0, t \to \infty$, maka rumus MTTF adalah:

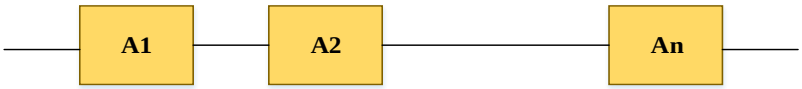
$$MTTF = \int_0^{\infty} R_t dt \qquad (7)$$

2.4 *Reliability Block Diagram*

Reliability block diagram adalah representasi dari kinerja keandalan suatu sistem (Trivedi & Bobbio, 2017). Sebuah *reliability block diagram* (RBD) menunjukkan *logical connections* antar komponen yang dibutuhkan dalam keberhasilan sebuah sistem. Suatu komponen atau item hanya dinyatakan pada dua keadaan, yaitu keadaan mampu beroperasi dengan layak (*operational*) atau keadaan tidak mampu beroperasi dengan layak (*fail*). *Reliability block diagram* menunjukkan bagaimana melakukan evaluasi terhadap suatu keandalan dari setiap blok pada suatu sistem. Oleh karena itu, perlu dilakukan investigasi pada struktur sistem dan *failure modes* pada sistem, sehingga sistem perlu dipecah menjadi *logical blocks* yang sesuai agar mempermudah proses analisis. Hal yang harus diketahui terlebih dahulu sebelum membuat sebuah *reliability block diagram* adalah mengetahui keandalan (*reliability*) atau ketersediaan (*availability*) pada setiap blok. Kemudian mendefinisikan *logical connections* antar blok. *Reliability block diagram* (RBD) sendiri terbagi menjadi tiga macam, yaitu *series system*, *parallel system*, dan *k-out-of-n system*.

2.4.1 Series System

Komponen-komponen dalam suatu sistem dinyatakan sebagai *series system* adalah ketika setiap komponen harus dalam keadaan mampu beroperasi dengan layak (*operational*) bagi suatu sistem (Trivedi & Bobbio, 2017). *Series system* adalah suatu sistem dikatakan gagal atau mati jika terdapat satu komponen yang tidak dapat berfungsi (Alkaff & Qomarudin, 2020). Gambar 2.3 berikut merupakan gambaran *series system* dengan n komponen.



Gambar 2.3 *Series system* dengan n komponen
Sumber: (Trivedi & Bobbio, 2017)

Jika $P_i = P\{E_i\}$ adalah probabilitas dari kejadian E_i dimana komponen i dapat berfungsi, maka probabilitas dari *series system* $P\{S\}$ dengan sistem S sebagai berikut:

$$P\{S\} = P\{E_1 \cap E_2 \cap \ldots\ldots \cap E_n\}$$
$$= P\{E_1\}\, P\{E_2\} \ldots\ldots P\{E_n\}$$
$$P\{S\} = \prod_{i=1}^{n} P\{E_i\} \quad (8)$$

dimana $E_1, E_2, \ldots\ldots E_n$ adalah *mutually independent*, artinya adalah *failure* (*and repair*) *process* pada setiap komponen dalam sistem adalah tidak terikat dengan komponen lainnya.

Menurut Alkaff & Qomarudin (2020) untuk sistem seri jika T_s dinotasikan sebagai *lifetime* dari sebuah *series system*, maka:

$$T_s = min\,(T_1, T_2, \ldots\ldots, T_N) \quad (9)$$

T_s dari sistem seri merepresentasikan distribusi PH $(n_s, \boldsymbol{a}_s, \boldsymbol{A}_s)$, maka:

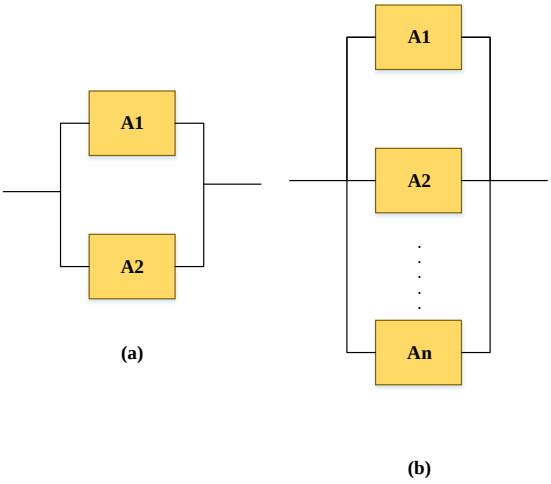
$$n_s{}^{(i)} = n_s{}^{(i-1)} n_i \quad (10)$$
$$\boldsymbol{a}_s{}^{(i)} = \boldsymbol{a}_s{}^{(i-1)} \otimes \boldsymbol{a}_i \quad (11)$$
$$\boldsymbol{A}_s{}^{(i)} = \boldsymbol{A}_s{}^{(i-1)} \oplus \boldsymbol{A}_i \quad (12)$$

dimana $i = 2,3, \ldots, N$ dengan kondisi awal. Sehingga, formula untuk menghitung keandalan pada sistem seri adalah:

$$R_s(t) = \prod_{i=1}^{N} R_i(t) \quad (13)$$

2.4.2 Parallel System

Trivedi & Bobbio (2017) menyatakan bahwa jika terdapat dua independen komponen dalam suatu sistem, sistem dinyatakan sebagai *parallel system* ketika kedua komponen tersebut mengalami kegagalan (*fail*), maka sistem turut mengalami kegagalan (*fail*). Gambar 2.4 berikut merupakan gambaran *parallel system* dengan dua komponen dan n komponen.



Gambar 2.4 RBD pada sistem *parallel*: (a) dua komponen; (b) n komponen
Sumber: (Trivedi & Bobbio, 2017)

Jika kejadian E_i adalah komponen i $(i = 1,2)$ yang dapat berfungsi dengan baik dan $\bar{E}_i$ adalah komponen *i* yang gagal, maka E_p adalah kejadian pada *parallel system* yang dapat berfungsi dan $\bar{E}_p$ adalah kejadian pada *parallel system* yang gagal. Sehingga diperoleh persamaan sebagai berikut.

$$\bar{E}_p = \bar{E}_1 \cap \bar{E}_2$$

$$P\{\bar{E}_p\} = P\{\bar{E}_1 \cap \bar{E}_2\} = P\{\bar{E}_1\}P\bar{E}_2\}$$

$$E_p = E_1 \cup E_2 = E_1 \cup (\bar{E}_1 \cap \bar{E}_2)$$

$$P\{E_p\} = P\{E_1 \cup E_2\} = P\{E_1\} + P\{E_2\} - P\{E_1\}P\{E_2\}$$

$$P\{E_p = P\{E_1\} + P\{\bar{E}_1 \cap E_2\} = P\{E_1\} + (1 - P\{E_1\})P\{E_2\} \quad (14)$$

Dalam sistem paralel jika T_s dinotasikan sebagai *lifetime* dari sebuah sistem paralel, maka:

$$T_s = \max(T_1, T_2, \dots \dots, T_N) \quad (15)$$

T_s dari sistem paralel merepresentasikan distribusi PH $(n_s, \boldsymbol{a}_s, \boldsymbol{A}_s)$, maka:

$$n_s{}^{(i)} = n_s{}^{(i-1)} n_i + n_s{}^{(i-1)} + n_i \quad (16)$$

$$\boldsymbol{a}_s{}^{(i)} = [\boldsymbol{a}_s{}^{(i-1)} \otimes \boldsymbol{a}_i, 0,0] \quad (17)$$

$$\boldsymbol{A_s}^{(i)} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{A_s}^{(i-1)} \oplus \boldsymbol{A_i} & \boldsymbol{I}_{n_{s(i-1)}} \otimes \boldsymbol{b_i} & \boldsymbol{b_s}^{(i-1)} \otimes \boldsymbol{I}_{n_i} \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{A_s}^{(i-1)} & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{A_i} \end{bmatrix} \quad (18)$$

dimana $i = 2,3, \dots, N$ dengan kondisi awal dan $\boldsymbol{b}_i = -\boldsymbol{A}_i\boldsymbol{u}$; $\boldsymbol{b}_s{}^{(i-1)} = -\boldsymbol{A}_s{}^{(i-1)}\boldsymbol{u}$. Sehingga, formula untuk menghitung keandalan pada sistem paralel adalah:

$$R_s(t) = 1 - \prod_{i=1}^{N} (1 - R_i(t)) \tag{19}$$

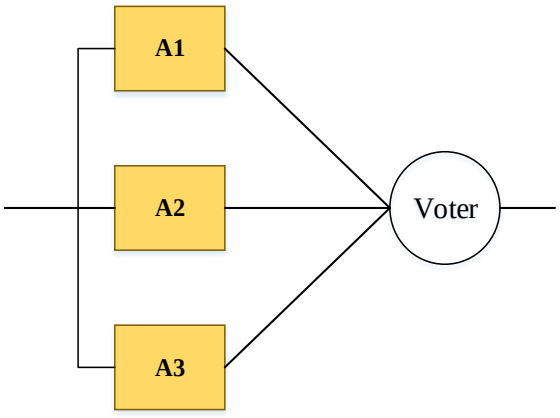
2.4.3 K-Out-Of-N System

Dalam mempertimbangkan suatu kegagalan dalam suatu sistem, terdapat dua kemungkinan kejadian, yaitu *type I error* atau *false positive* dan *type II error* atau *false negative*. Untuk menghindari terjadinya dua kesalahan tersebut, maka *parallel system* adalah salah satu solusinya. Namun, jika terjadi kegagalan pada *n* komponen dalam sistem *parallel* tersebut, maka sistem akan mengalami kegagalan. Oleh karena itu, sebaiknya sistem menerapkan *k-out-of-N* atau dikenal sebagai *triple modular redundancy* (TMR) (Trivedi & Bobbio, 2017).

Jika dalam suatu sistem terdapat n *parallel* komponen dimana untuk mengoperasikan suatu sistem, sistem membutuhkan $k(\leq n)$ komponen atau lebih dari n yang mampu beroperasi, maka sistem disebut sebagai *k-out-of-n*. Jika R dinotasikan sebagai keandalan dari suatu komponen *individual*, maka:

$$P\left\{\frac{i}{n}\right\} = \binom{n}{i} R^i (1-R)^{n-i} \tag{20}$$

dimana $\binom{n}{i}$ adalah koefisien binomial. Gambar 2.5 berikut merupakan gambaran *two-out-of-three majoring voting system*.



Gambar 2.5 *Two-out-of-three majority voting system*
Sumber: (Trivedi & Bobbio, 2017)

Berdasarkan Gambar 2.5, rumus keandalan pada sistem dengan setidaknya $i \geq k$ komponen dapat berfungsi sebagi berikut:

$$R_{k/n} = \sum_{i=k}^{n} P\left\{\frac{i}{n}\right\} = \sum_{i=k}^{n} \binom{n}{i} R^i (1-R)^{n-1} \quad (21)$$

Jika pada *series system* dengan $k = n$, maka:

$$R_{n/n} = \sum_{i=k}^{n} \binom{n}{i} R^i (1-R)^{n-i} = R^n \quad (22)$$

Jika pada *parallel system* dengan $k = 1$, maka:

$$R_{1/n} = \sum_{i=k}^{n} \binom{n}{i} R^i (1-R)^{n-i} = 1 - (1-R)^n \quad (23)$$

Untuk TMR *system*, maka persamaan nya menjadi:

$$R_{2/3} = R_{TMR} = \sum_{i=2}^{3} \binom{3}{i} R^i (1-R)^{3-i} = 3R^2(1-R) + R^3 \quad (24)$$

Perlu diketahui bahwa:

$$R_{TMR} = \begin{cases} > R \; jika \; R > \frac{1}{2} \\ = R \; jika \; R = \frac{1}{2} \\ < R \; jika \; R < \frac{1}{2} \end{cases} \quad (25)$$

2.5 *Phase-Type Distribution*

Distribusi *phase-type* (PH *distribution*) adalah distribusi dari waktu yang dibutuhkan *X* untuk masuk ke dalam *absorbing state* dari transisi *state* pada sebuah *absorbing continuous time Markov process* $\{X_{(t)}\}_{t\geq 0}^{\infty}$ (Buchholz, et al., 2014). Sementara itu, Alkaff & Qomarudin (2020) mendefinisikan *phase-type distribution* merupakan distribusi waktu untuk proses penyerapan dalam proses Markov homogen terbatas dan tidak dapat direduksi dengan *n transient states* dan sebuah *absorbing state* $(n+1)$ yang dinotasikan sebagai *rate transition matrix* $\boldsymbol{Q}$.

$$\boldsymbol{Q} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{A} & \boldsymbol{b} \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} \end{bmatrix} \quad (26)$$

Matriks $\boldsymbol{A}$ adalah matriks *transition state* yang menggambarkan transisi antar *transient states*, dan vektor $\boldsymbol{b}$ menggambarkan transisi dari *transient state* menjadi *absorbing state*. $\boldsymbol{Q}$ adalah matriks yang jumlah setiap barisnya sama dengan nol. Diagonal A_{ii} bernilai negatif dan setiap elemen sama dengan jumlah seluruh elemen pada baris i, sedangkan A_{ij} menggambarkan laju transisi dari *transient*

state i menuju *transient state j* (non-negatif). Oleh karena itu, $\boldsymbol{A}$ adalah matriks non-singular. Karena $\boldsymbol{b} = -\boldsymbol{A_u}$, sehingga $\boldsymbol{b}$ adalah laju transisi dari *transient state* menuju *absorbing state*.

Menurut Neuts (1994), distribusi PH digambarkan seperti berikut:

$$F_x(x) = 1 - \boldsymbol{a}\boldsymbol{e}^{\boldsymbol{A}_x}\boldsymbol{u} \quad x \geq 0, \tag{27}$$

dimana $\boldsymbol{a}$ adalah *initial state* yang menggambarkan probabilitas proses dimulai pada *transient states* dan $\boldsymbol{a}\boldsymbol{u} = 1$, dimana $\boldsymbol{u}$ adalah sebuah vektor dengan seluruh elemen bernilai sama dengan 1. Distribusi $\boldsymbol{F_x(x)}$ adalah PH *distribution* dengan $(n, \boldsymbol{a}, \boldsymbol{A})$ sebagai parameter. Momen *i* pada *X* dapat diturunkan menjadi:

$$E[X^i] = (-1)^i i! \left(\boldsymbol{a}A^{-i}\boldsymbol{u}\right) \quad i = 1, 2, \ldots\ldots, n \tag{28}$$

Expected total time adalah rata-rata dari lama waktu yang dihabiskan pada *state j* sebelum menuju *absorbing state*. Oleh karena itu, diperoleh persamaan untuk rata-rata kejadian sebagai berikut:

$$\lambda = \frac{1}{E[X]} \tag{29}$$

Persamaan untuk *squared coefficient of variation* adalah sebagai berikut:

$$CV^2 = \frac{E[X]^2}{(E[X])^2} - 1 \tag{30}$$

Tujuan dari menggunakan *phase-type distribution* (distribusi PH) adalah untuk memungkinkan proses perancangan algoritma yang mudah diimplementasikan dalam bentuk program komputer untuk secara langsung memperoleh *mathematical expressions* dari keandalan pada suatu sistem (Alkaff & Qomarudin, 2020). Pada analisis keandalan, *phase-type distribution* sendiri memiliki beberapa kelebihan. Kelebihan dari distribusi PH pada *reliability analysis* menurut Alkaff & Qomarudin (2020) sebagai berikut:

- Distribusi PH dapat digunakan sebagai model pengganti untuk tipe distribusi pada *constant failure rate* (CFR), *increasing failure rate* (IFR), dan *decreasing failure rate* (DFR), walaupun distribusi dengan *failure rate* mengalami kenaikan dan penurunan pada *bathub curves* (BFR)
- Distribusi PH memiliki *closure properties* yang mudah digunakan untuk operasi campuran, konvolusi, dan pembentukan dalam sistem yang koheren, sehingga berguna dalam mengekspresikan fungsi keandalan sistem dalam hal fungsi keandalan komponennya (Trivedi & Bobbio, 2017).

- PH *distribution* mampu mengurangi kebutuhan dari *numerical integration* menjadi *numerical algebra* dan menghasilkan solusi pada *algrebaic expressions* secara sederhana untuk menemukan parameter pada sistem stokastik, sehingga perhitungan MTTF akan lebih mudah dilakukan (Assaf & Levikson, 1982).
- Distribusi PH mudah diimplementasikan pada *multistate systems* yang memiliki *multistate components*. PH *distribution* mampu menggambarkan tingkatan-tingkatan pada kondisi yang baik sebelum terjadinya kegagalan pada sistem tersebut.

Distribusi PH memiliki beberapa jenis bentuk distribusi, seperti distribusi eksponensial, distribusi *Erlang*, distribusi *hypo-exponential*, distribusi *hyper-exponential*, dan distribusi *coxian* (Buchholz, et al., 2014). Berikut merupakan penjelasan dari masing-masing distribusi tersebut:

a) Distribusi Eksponensial

Distribusi eksponensial adalah salah satu bentuk dari distribusi PH yang memiliki satu *transient state* dengan λ sebagai parameternya. Gambar 2.6 merupakan diagram dari diagram eksponensial.

Gambar 2.6 *Exponential Distribution Diagram*
Sumber: (Buchholz, et al., 2014)

Distribusi eksponensial memiliki *density function* dengan persamaan sebagai berikut:

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x} \qquad x \geq 0 \tag{31}$$

Dengan fungsi distribusi sebagai berikut:

$$F(x) = 1 - \lambda e^{-1} \qquad x \geq 0 \tag{32}$$

Persamaan rata-rata dari distribusi eksponensial adalah sebagai berikut:

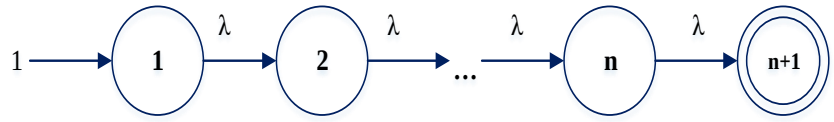
$$E[X] = \frac{1}{\lambda} \tag{33}$$

Serta persamaan variansi pada distribusi eksponensial adalah:

$$VAR[X] = \frac{1}{\lambda^2} \tag{34}$$

b) Distribusi Erlang

Distribusi Erlang adalah salah satu bentuk distribusi PH yang menggambarkan distribusi eksponensial dengan jumlah n *state* dengan lama waktu perpindahan dari *state* i menuju *state* j yang sama sebesar λ. Gambar 2.7 merupakan diagram dari distribusi Erlang.



Gambar 2.7 *Erlang Distribution Diagram*
Sumber: (Buchholz, et al., 2014)

Distribusi Erlang memiliki *density function* dengan persamaan sebagai berikut:

$$f(x) = \frac{\lambda^n}{(n-1)!} x^{n-1} e^{-\lambda x} \qquad x \geq 0 \tag{35}$$

Dengan fungsi distribusi sebagai berikut:

$$F(x) = 1 - \sum_{i=0}^{n-1} \frac{(\lambda x)^i}{i!} \qquad x \geq 0 \tag{36}$$

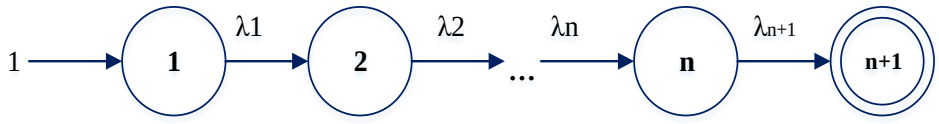
Serta persamaan *squared coefficient of variation* dari distribusi Erlang adalah sebagai berikut

$$CV^2 = n^{-1} \tag{37}$$

dimana nilai koefisien variansi pada distribusi Erlang tergantung pada jumlah *state* yang ada, nilai $n > 1$ yang memiliki dampak pada nilai koefisien variansi menjadi < 1.

c) Distribusi *Hypo-Exponential*

Distribusi *hypo-exponential* adalah distribusi yang bentuknya terlihat seperti disribusi Erlang, namun, perbedaannya terletak pada perpindahan dari *state i* menuju *state j* berbeda pada setiap *state*. Gambar 2.8 merupakan diagram dari distribusi *hypo-exponential*.



Gambar 2. 8 *Hypo-Exponential Distribution Diagram*
Sumber: (Buchholz, et al., 2014)

Distribusi *hypo-exponential* ini memiliki *density function* yang persamaan nya adalah sebagai berikut:

$$f(x) = \sum_{i=1}^{n} \left\{ \prod_{j=1, j\neq 1}^{n} \frac{\lambda(j)}{\lambda(j) - \lambda(i)} \right\} f_i(x) \quad x \geq 0, \lambda(i) \neq \lambda(j) \quad (38)$$

Persamaan dari rata-rata distribusi *hypo-exponential* adalah:

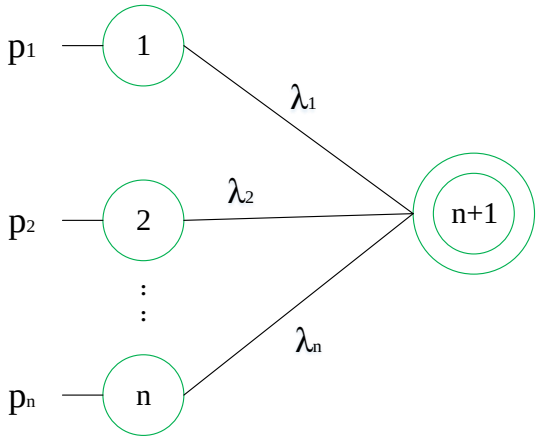
$$E[X] = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{\lambda(i)} \quad (39)$$

Persamaan dari variansi pada distribusi *hypo-exponential*.

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

d) Distribusi *Hyper-Exponential*

Distribusi *hyper-exponential* adalah distribusi yang terdiri atas dua *states*, tiga *states*, atau lebih yang membentuk sebuah bentuk parallel dan terjadi secara independen (saling lepas). Gambar 2.9 merupakan diagram dari distribusi *hypo-exponential*.



Gambar 2.9 *Hyper-Exponential Distribution Diagram*
Sumber: (Buchholz, et al., 2014)

Distribusi *hyper-exponential* memiliki *density function* yang memiliki persamaan sebagai berikut:

$$f(x) = \sum_{i=1}^{n} \pi(i)\lambda(i)e^{-\lambda(i)x} \quad x \geq 0 \quad (41)$$

Nilai $\pi(i) > 0$ untuk seluruh *state* i yang ada dan nilai dari $\sum_{i=1}^{n} \pi_i = 1$. Adapun fungsi dari distribusi *hyper-exponential* adalah sebagai berikut:

$$F(x) = \sum_{i=0}^{n-1} \pi(i)\left(1 - e^{-\lambda x}\right) \quad x \geq 0 \tag{42}$$

Persamaan rata-rata untuk distribusi *hyper-exponential* sebagai berikut:

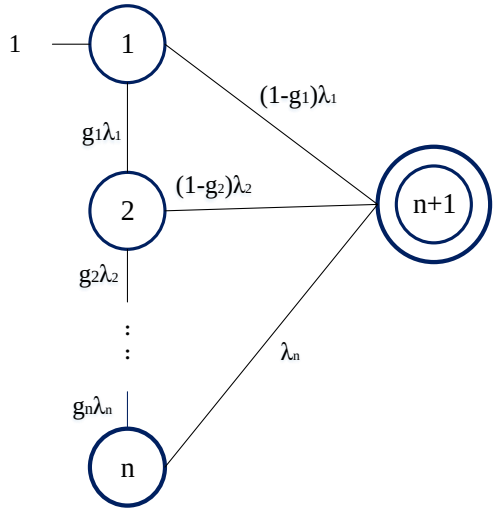
$$E[X] = \sum_{i=1}^{n} \frac{\pi(i)}{\lambda(i)} \tag{43}$$

Serta berikut merupakan persamaan variansi pada distribusi *hyper-exponential*.

$$VAR[X] = 2\sum_{i=1}^{n} \frac{\pi(i)}{\lambda(i)^2} - \left(\sum_{i=1}^{n} \frac{\pi(i)}{\lambda(i)^2}\right)^2 \tag{44}$$

e) Distribusi *Coxian*

Distribusi *coxian* adalah distrbusi yang merupakan perpaduan antara distribusi *hypo-exponential* dengan distribusi *hyper-exponential*. Gambar 2.10 merupakan diagram dari distribusi *coxian*.



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

Pada distribusi *coxian* terdapat *initial* distribusi vektor yaitu $\pi = [1,0,\ldots,0]$ dan setelah pada *state* i, proses akan dipecah menjadi n *state* dengan rata-rata λ_i yang berbeda tiap *state*.

2.6 Operasi *Kronecker*

Operasi *kronecker* adalah operasi dari perkalian matriks dan biasanya digunakan pada metode *Markov Chain*. Jika $\boldsymbol{A} = [A_{ij}]$ dan $\boldsymbol{B} = [B_{ij}]$ adalah suatu matriks persegi panjang yang memiliki dimensi $n_1 \times n_2$ dan $m_1 \times m_2$,

maka $\boldsymbol{A} \otimes \boldsymbol{B}$ merupakan *kronecker product* yang menghasilkan matriks persegi panjang dengan dimensi $n_1 m_1 \times n_2 m_2$. Berikut merupakan gambaran bentuk matriks $\boldsymbol{A} \otimes \boldsymbol{B}$.

$$\boldsymbol{A} \otimes \boldsymbol{B} \begin{bmatrix} A_{11}\boldsymbol{B} & \dots & A_{1n2}\boldsymbol{B} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{n_1 1}\boldsymbol{B} & \dots & A_{n_1 n_2}\boldsymbol{B} \end{bmatrix} \tag{45}$$

Jika $\boldsymbol{A} = [A_{ij}]$ dan $\boldsymbol{B} = [B_{ij}]$ adalah matriks persegi dengan dimensi masing-masing yaitu $n \times n$ dan $\times m$, sehingga *kronecker product* $\boldsymbol{A} \otimes \boldsymbol{B}$ menghasilkan matriks dengan dimensi $nm \times nm$, dengan persamaan sebagai berikut:

$$\boldsymbol{A} \oplus \boldsymbol{B} = \boldsymbol{A} \otimes \boldsymbol{I}_n + \boldsymbol{I}_m \otimes \boldsymbol{B} \tag{46}$$

Dimana $\boldsymbol{I_m}$ dan $\boldsymbol{I_n}$ adalah matriks identitas dalam *order* m dan n. *Kronecker product* dan *kronecker sum* bukan merupakan sifat komutatif. Berikut merupakan *properties* penting yang terdapat dalam operasi *Kronecker* yaitu:

$$e^{\boldsymbol{A_1} t} \otimes e^{\boldsymbol{A_2} t} = e^{(\boldsymbol{A_1} \oplus \boldsymbol{A_2}) t} \tag{47}$$

Jika T_1 dan T_2 adalah variabel acak *non-identical* dengan sifat *independent*, maka dalam *phase type distribution* parameternya adalah $(n_1, \boldsymbol{a}_1, \boldsymbol{A}_1)$ dan $n_2, \boldsymbol{a}_2, \boldsymbol{A}_2)$. Teorema yang digunakan dalam operasi Kronecker menurut Alkaff & Qomaruddin (2020) sebagai berikut:

a. Teorema 1: Jika min (T_1, T_2) adalah *PH distribustion* dengan parameter $n_s, \boldsymbol{a}_s, \boldsymbol{A}_s)$ yang diperoleh dari persamaan berikut:

$$n_s = n_1 n_2 \tag{48}$$

$$\boldsymbol{a_s} = \boldsymbol{a_1} \otimes \boldsymbol{a_2} \tag{49}$$

$$\boldsymbol{A_s} = \boldsymbol{A_1} \oplus \boldsymbol{A_2} \tag{50}$$

b. Teorema 2: Jika max (T_1, T_2) adalah *PH distribustion* dengan parameter $n_s, \boldsymbol{a}_s, \boldsymbol{A}_s)$ yang diperoleh dari persamaan berikut:

$$n_s = n_1 n_2 + n_1 + n_2 \tag{51}$$

$$\boldsymbol{a_s} = [\boldsymbol{a_1} \otimes \boldsymbol{a_2}, \boldsymbol{a_2}(\boldsymbol{n_2} + \boldsymbol{1})\boldsymbol{a_1}.\boldsymbol{a_1}(\boldsymbol{n_1} + \boldsymbol{1})\boldsymbol{a_2}] = [\boldsymbol{a_1} \otimes \boldsymbol{a_2}, \boldsymbol{0}, \boldsymbol{0}] \tag{52}$$

$$\boldsymbol{A_s} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{A_1} \oplus \boldsymbol{A_2} & \boldsymbol{I_{n_1}} \otimes \boldsymbol{b_2} & \boldsymbol{b_1} \otimes \boldsymbol{I_{n_2}} \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{A_1} & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{A_2} \end{bmatrix} \tag{53}$$

c. Teorema 3 : $(T_1, T_2) = T_1 + T_2$ adalah *PH distribustion* dengan parameter $(n_s, \boldsymbol{a}_s, \boldsymbol{A}_s)$, yang diperoleh dari persamaan berikut:

$$n_s = n_1 + n_2 \tag{54}$$

$$\boldsymbol{a_s} = [\boldsymbol{a_1}.\boldsymbol{a_1}(\boldsymbol{n_1}+\boldsymbol{1})\boldsymbol{a_2}] = [\boldsymbol{a_1},\boldsymbol{0}] \tag{55}$$

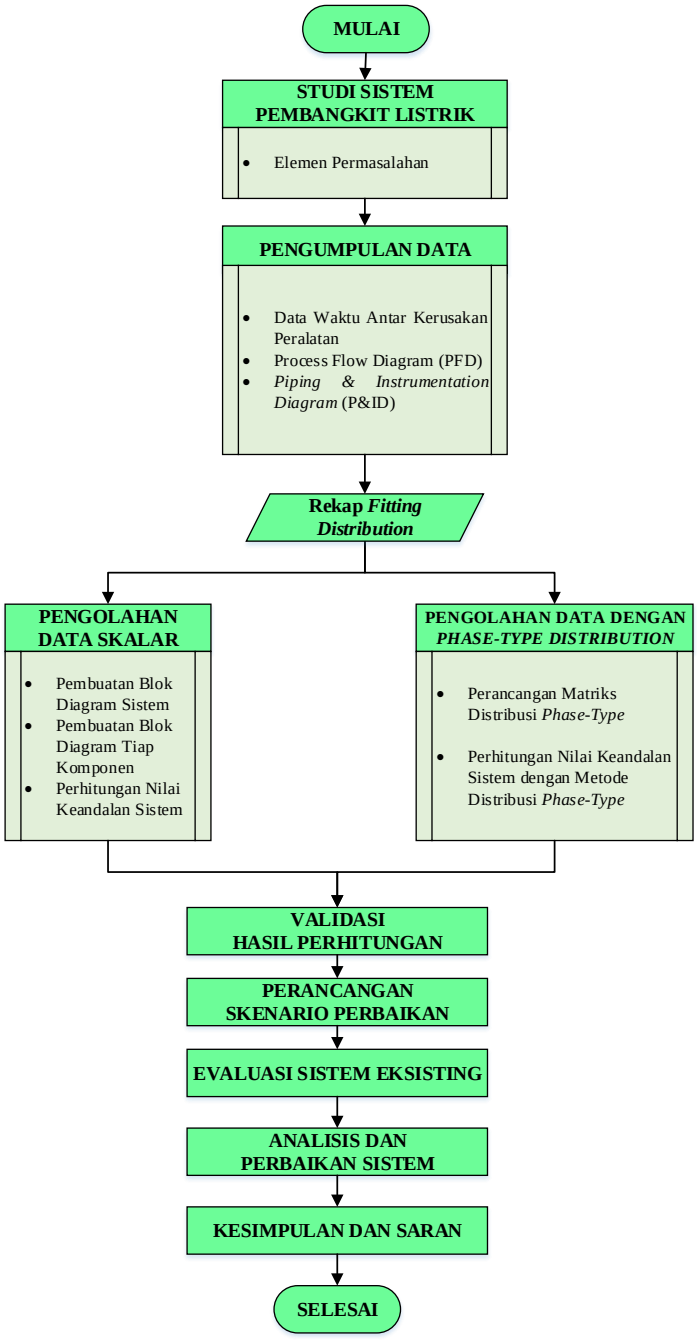
$$\boldsymbol{A_s} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{A_1} & \boldsymbol{b_1 a_2} \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{A_2} \end{bmatrix} \tag{56}$$

dimana $\boldsymbol{b_1} = -\boldsymbol{A_1 u}$ dan $\boldsymbol{a_1}(\boldsymbol{n_1}+\boldsymbol{1})$ adalah probabilitas yang menunjukkan bahwa proses dimulai pada *absorbing state* dan diasumsikan sama dengan 0. Sementara itu $\boldsymbol{A_s}$ dinotasikan sebagai suatu *exponent* pada fungsi keandalan, sedangkan, blok $\boldsymbol{A_1} \oplus \boldsymbol{A_2}$ merepresentasikan fungsi keandalan suatu produk dengan dua komponen, dan $\boldsymbol{A_1}$ dan $\boldsymbol{A_2}$ merepresentasikan fungsi keandalan pada setiap komponen.

(*Halaman ini sengaja dikosongkan*)

BAB 3
METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini akan dijelaskan mengenai metodologi yang mencakup *flowchart* penelitian dan penjelasan dari *flowchart* penelitian yang digunakan dalam penelitian. Gambar 3.1 merupakan alur proses yang digunakan dalam penelitian ini.



Gambar 3.1 *Flowchart* Metodologi Penelitian

3.1 Tahap Studi Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Gas

Pada tahap ini dilakukan studi sistem pembangkit listrik tenaga gas pada PT Pupuk Indonesia Energi. Studi sistem pembangkit listrik tenaga gas dapat dilakukan dengan memahami elemen permasalahan. Elemen permasalahan dalam sistem pembangkit listrik tenaga gas PT Pupuk Indonesia Energi sebagai berikutt:

a. *Decision maker* pada permasalahan ini yaitu manajer pemeliharaan PT Pupuk Indonesia Energi.
b. *Decision maker's objective* pada permasalahan ini yaitu meningkatkan keandalan sistem pembangkit listrik tenaga gas.
c. *Decision criterion* yaitu peningkatan nilai keandalan peralatan atau subsistem pada sistem pembangkit listrik tenaga gas.
d. *Performance* yaitu keandalan sistem pembangkit listrik tenaga gas PT Pupuk Indonesia Energi.
e. *Alternative courses of action* yaitu perubahan konfigurasi struktur sistem (*redundancy*) dan penggantian peralatan pada sistem pembangkit listrik PT Pupuk Indonesia Energi.
f. Konteks permasalahan yaitu keandalan sistem pembangkit listrik tenaga gas pada PT Pupuk Indonesia Energi.

3.2 Tahap Pengumpulan Data

Pada tahap ini dilakukan pengumpulan data yang digunakan dalam perhitungan dengan metode skalar dan metode distribusi PH. Pengumpulan data diawali dengan identifikasi dan pengamatan langsung ke objek amatan. Penelitian ini membutuhkan tiga jenis data, yaitu data struktural, data operasional, dan data numerik. Data struktural merupakan data yang menampilkan struktur dari sistem pembangkit listrik seperti *piping* & *instrumentation diagram* (P&ID) dari masing-masing peralatan pada sistem pembangkit listrik tenaga gas. Data operasional merupakan data yang memberikan informasi tahapan sistem bekerja seperti *process flow diagram*. Data numerik merupakan data kuantitatif pada sistem, seperti data waktu antar kerusakan peralatan. Data yang digunakan dalam perhitungan keandalan adalah data periode tahun 2017 hingga 2019 sesuai dengan yang diberikan oleh PT Pupuk Indonesia Energi. Data yang tidak memenuhi persyaratan

akan dicari pada salah satu dari alternatif, seperti OREDA *handbook, benchmark*, dan wawancara.

3.3 Tahap Pengolahan Data

Pada tahap ini dilakukan proses pengolahan data berdasarkan data-data yang telah diperoleh pada tahap sebelumnya. Proses pengolahan data diawali dengan melakukan *fitting* distribusi. Data yang digunakan dalam *fitting* distribusi adalah data waktu antar kerusakan mesin (*time to failure*).

3.3.1 Pengolahan Data Skalar

Proses pengolahan data skalar diawali dengan pembuatan *reliability block diagram* berdasarkan data P&ID PT Pupuk Indonesia Energi. *Reliability block diagram* yang dibuat adalah blok diagram sistem dan blok diagram setiap subsistem pada sistem pembangkit listrik tenaga gas. Kemudian, dilakukan perhitungan keandalan sistem dengan melihat konfigurasi struktur (seri, paralel, atau *k-out-of-N system*) dari blok diagram tersebut.

3.3.2 Pengolahan Data dengan Metode Distribusi Phase-Type

Proses pengolahan data dengan metode distribusi PH diawali dengan *fitting* distribusi data *time to failure* menjadi n, a, serta A yang merupakan representasi dari distribusi PH. n adalah *state orde*, a adalah *initial state probability*, dan A adalah *state transition matrix*. Kemudian dilakukan perhitungan keandalan sistem dengan menggunakan *closure properties* distribusi PH.

3.4 Validasi Hasil Perhitungan

Pada tahap ini akan dilakukan validasi terkait model konseptual dan model matematis yang digunakan. Validasi hasil perhitungan menggunakan plot *reliability function, hazard function,* dan nilai MTTF. Sementara itu, validasi pendekatan distribusi *phase-type* digambarkan dalam bentuk matriks yang mendeskripsikan perilaku keandalan pada sistem eksisting.

3.5 Perancangan Skenario Perbaikan

Pada tahap ini dilakukan perancangan skenario perbaikan terhadap sistem pembangkit listrik PT Pupuk Indonesia Energi. Perancangan skenario perbaikan didasarkan atas subsistem kritis yang memiliki pengaruh besar dalam keandalan

sistem pembangkit listrik tenaga gas PT Pupuk Indonesia Energi. Penentuan subsistem kritis dilakukan dengan metode *Birnbaun Index*. Skenario perbaikan dilakukan dengan melakukan perubahan konfigurasi struktur (*redundancy*) dan penggantian peralatan pada subsistem kritikal.

3.6 Evaluasi Sistem Eksisting

Pada tahap ini dilakukan evaluasi terhadap sistem pembangkit listrik tenaga gas kondisi eksisting. Proses evaluasi sistem eksisting didasarkan pada hasil perhitungan keandalan sistem pembangkit listrik kondisi eksisting dengan metode konvensional dan metode distribusi PH. Tahap ini juga menjelaskan keunggulan dan kelemahan dalam menghitung keandalan sistem dengan pendekatan distribusi PH.

3.7 Analisis dan Perbaikan Sistem

Pada tahap ini dilakukan analisis sensitivitas terhadap faktor-faktor yang mempengaruhi performansi keandalan sistem pembangkit listrik tenaga gas. Skenario yang digunakan adalah pengaruh konfigurasi struktur sistem (*redundancy*) dan pengaruh penggantian peralatan terhadap keandalan sistem pembangkit listrik tenaga gas.

3.8 Kesimpulan dan Saran

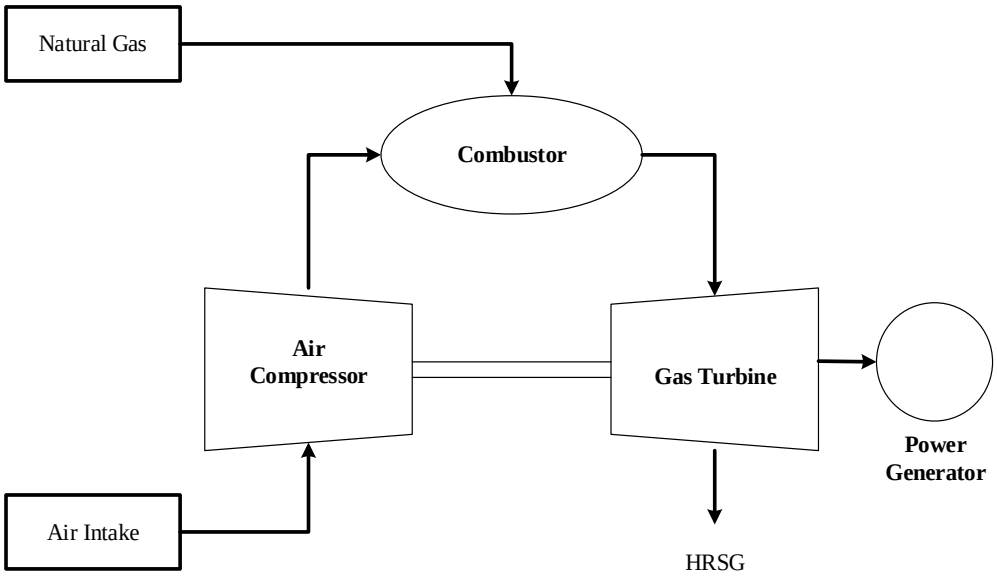
Pada tahap ini dilakukan pembuatan kesimpulan yang menjawab tujuan dari penelitian yang telah dilakukan. Saran dan rekomendasi penelitian juga diberikan untuk penelitian selanjutnya.

BAB 4
PENGUMPULAN DAN PENGOLAHAN DATA

Pada bab ini akan dibahas mengenai deskripsi sistem, blok diagram keandalan, rekap data hasil *fitting* distribusi, pengolahan data metode skalar, pengolahan data metode *phase-type distribution*, dan penentuan subsistem kritis dengan metode *Birnbaun Index*.

4.1 Deskripsi Sistem

Proses pembangkit listrik tenaga gas pada PT Pupuk Indonesia Energi dijelaskan pada Gambar 4.1. Proses pembangkit listrik tenaga gas terdiri atas 4 subsistem utama, yaitu *air compressor*, *combustor*, *gas turbine*, dan *power generator*.



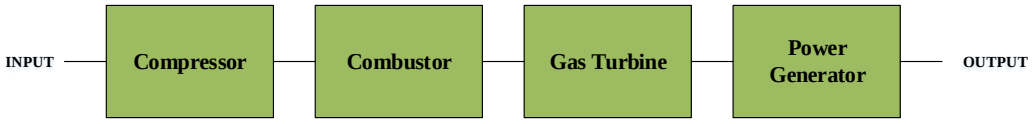
Gambar 4.1 *Process Flow Diagram* pada PT Pupuk Indonesia Energi
Sumber: PT Pupuk Indonesia Energi (2020)

Proses pembangkit listrik tenaga gas diawali dengan udara bebas masuk melalui bagian *air intake* menuju bagian *air compressor* untuk dilakukan pemampatan udara. Kemudian kompresor akan menaikkan suhu dan tekanan udara tersebut. Udara yang keluar dari *compressor* memiliki tekanan 80-120 psi. Selanjutnya udara bertekanan tersebut mengalir ke *combustor* untuk dilakukan proses pembakaran. Udara bertekanan tersebut dibakar dengan tekanan yang tetap dan menghasilkan *output* berupa gas panas. Gas panas dan bertekenan tinggi yang

dihasilkan akan masuk ke dalam turbin gas, sehingga turbin menghasilkan energi mekanik berupa putaran untuk menggerakkan *power generator*. Generator yang sudah berputar akibat adanya putaran pada turbin gas akan menghasilkan energi listrik. Energi listrik tersebut akan keluar untuk dialirkan ke Pabrik Amurea II dan Pabrik Unit Batu Bara (UBB). *Exhaust gas* dari turbin gas akan dibuang ke *Heat Recovery Steam Generator* (HRSG) untuk dimanfaatkan pada proses pembangkit *steam*.

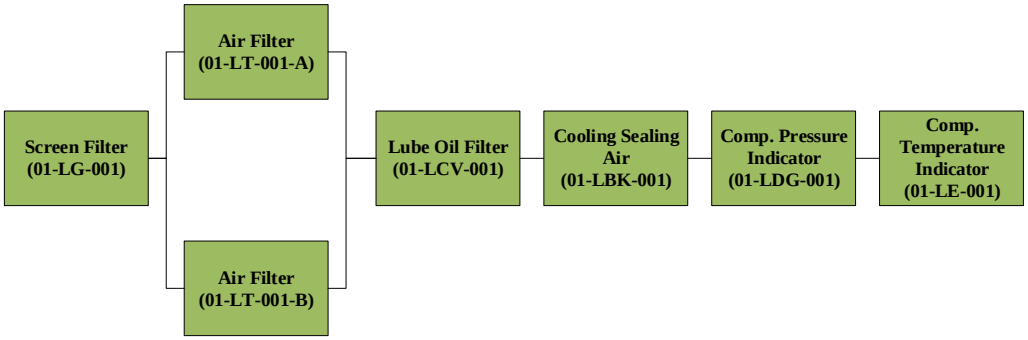
4.2 Blok Diagram Keandalan

Diagram aliran proses (*process flow diagram*) untuk pembentukan blok diagram pada sistem pembangkit listrik tenaga gas PT Pupuk Indonesia Energi diklasifikasikan dalam beberapa subsistem yang menggambarkan tingkat atau level dalam proses pembangkit listrik tenaga gas (PLTG). Subsistem utama pada proses pembangkit listrik tenaga gas PT Pupuk Indonesia Energi akan dijelaskan pada Gambar 4.2.



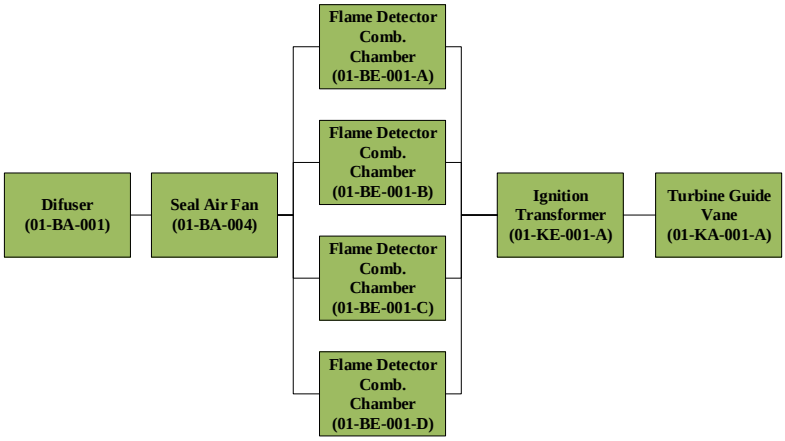
Gambar 4.2 Blok Diagram Keandalan Proses Pembangkit Listrik Tenaga Gas
Sumber: PT Pupuk Indonesia Energi

Gambar 4.2 menunjukkan blok diagram keandalan proses pembangkit listrik pada PT Pupuk Indonesia Energi. Blok diagram keandalan ini merupakan blok diagram pada level sistem (level 1) dan terdiri atas 4 subsistem utama, yaitu *compressor*, *combustor*, *gas turbine*, dan *power generator*. Blok diagram keandalan ini didasarkan pada hubungan antar subsistem dalam membentuk suatu sistem. Berdasarkan prosesnya, keseluruhan subsistem terhubung secara seri.



Gambar 4.3 Blok Diagram Keandalan pada Subsistem *Compressor*
Sumber: PT Pupuk Indonesia Energi (2020)

Gambar 4.3 menunjukkan blok diagram keandalan pada subsistem *compressor*. Blok diagram keandalan ini merupakan blok diagram pada level 2 dan terdiri atas 6 peralatan, yaitu *screen filter*, *air filter*, *lube oil filter*, *cooling sealing air*, *compressor pressure indicator*, dan *compressor temperature indicator*. Blok diagram keandalan ini didasarkan pada hubungan antar peralatan dalam membentuk subsistem *compressor*. Berdasarkan prosesnya, keseluruhan peralatan terhubung secara seri, kecuali peralatan *air filter* yang terhubung secara paralel.

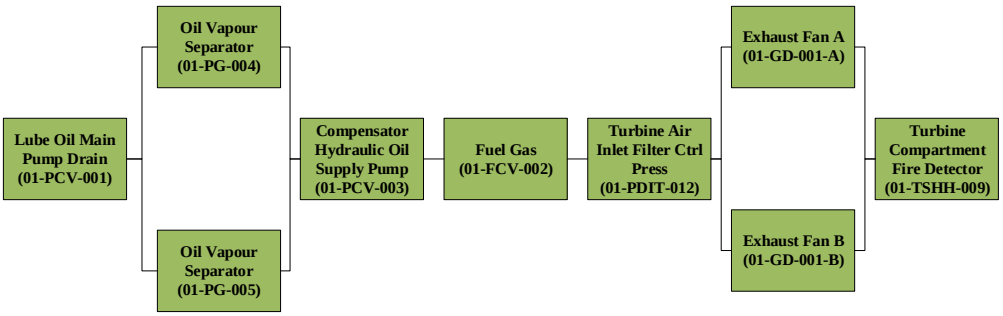


3 out of 4

Gambar 4.4 Blok Diagram Keandalan pada Subsistem *Combustor*
Sumber: PT Pupuk Indonesia Energi (2020)

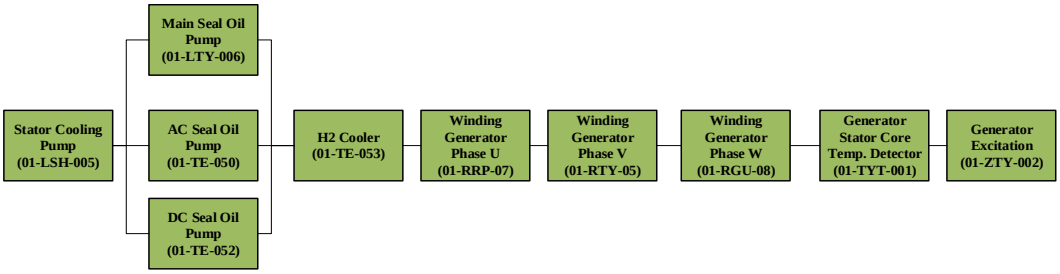
Gambar 4.4 menunjukkan blok diagram keandalan pada subsistem *combustor*. Blok diagram keandalan ini merupakan blok diagram pada level 2 dan terdiri atas beberapa peralatan seperti *difuser*, *seal air fan*, *flame detector*, *ignition transformer*, dan *turbine guide vane*. Blok diagram keandalan ini didasarkan pada hubungan antar peralatan dalam membentuk subsistem *combustor*. Berdasarkan

prosesnya, keseluruhan peralatan terhubung secara seri, kecuali peralatan *flame detector* yang terhubung secara *k out of N*.



Gambar 4.5 Blok Diagram Keandalan pada Subsistem *Gas Turbine*
Sumber: PT Pupuk Indonesia Energi (2020)

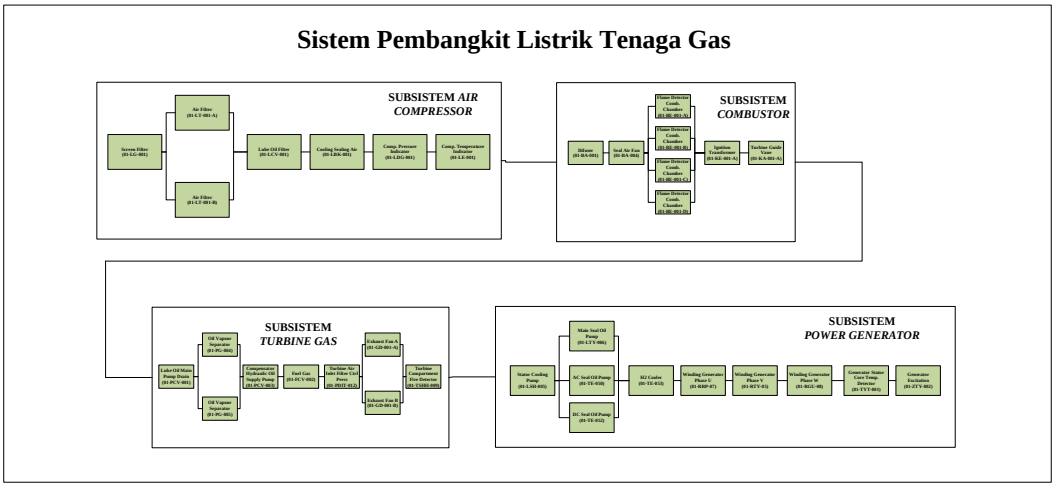
Gambar 4.5 menunjukkan blok diagram keandalan pada subsistem *gas turbine*. Blok diagram keandalan ini merupakan blok diagram pada level 2 dan terdiri atas beberapa peralatan seperti *lube oil main pump drain*, *oil vapour separator*, *compensator hydraulic oil supply pump*, *fuel gas*, *turbine air inlet filter control pressure*, *exhaust fan*, dan *turbine compartment fire detector*. Blok diagram keandalan ini didasarkan pada hubungan antar peralatan dalam membentuk subsistem *gas turbine*. Berdasarkan prosesnya, keseluruhan peralatan terhubung secara seri, kecuali peralatan *oil vapour separator* dan *exhaust fan* yang terhubung secara paralel.



Gambar 4.6 Blok Diagram Keandalan pada Subsistem *Power Generator*
Sumber: PT Pupuk Indonesia Energi (2020)

Gambar 4.6 menunjukkan blok diagram keandalan pada subsistem *power generator*. Blok diagram keandalan ini merupakan blok diagram pada level 2 dan terdiri atas *stator cooling pump*, *main seal oil pump*, AC *seal oil pump*, DC *seal oil pump*, H2 *cooler*, *winding generator phase* U, *winding generator phase* V, *winding generator phase* W, *generator stator core temperature detector*, *generator*

excitation. Blok diagram keandalan ini didasarkan pada hubungan antar peralatan dalam membentuk subsistem *power generator*. Berdasarkan prosesnya, keseluruhan peralatan terhubung secara seri, kecuali peralatan *seal oil pump* yang terhubung *k out of N*. Gambar 4.7 merupakan rekap blok diagram keandalan sistem pembangkit listrik tenaga gas pada PT Pupuk Indonesia Energi.



Gambar 4.7 Blok Diagram Keandalan Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Gas
Sumber: PT Pupuk Indonesia Energi (2020)

4.3 Rekap Data Hasil *Fitting* Distribusi

Tabel 4.1 merupakan tabel rekap data hasil dari proses *fitting* distribusi data kerusakan mesin. Data kerusakan mesin yang digunakan merupakan data kerusakan mesin periode 2017 hingga 2019. Data kerusakan peralatan (*time to failure*) diperoleh dengan melakukan wawancara terhadap pihak PT Pupuk Indonesia Energi. Selain itu, data kerusakan mesin juga diperoleh dari OREDA *handbook*. Proses *fitting* distribusi dilakukan dengan bantuan *software* Weibull++.

Tabel 4.1 Rekap Data Hasil *Fitting* Distribusi Data Kerusakan Peralatan

No	Nama Mesin	Hasil Fitting Distribusi	Parameter				Sumber Data
			Beta	Eta	Lambda	Gamma	
AIR COMPRESSOR							
1	Screen Filter	Eksponensial			1.64E-06		Data Historis Perusahaan
2	Air Filter	Weibull 2	1.058	2513.02			Data Historis Perusahaan

No	Nama Mesin	Hasil Fitting Distribusi	Parameter				Sumber Data
			Beta	Eta	Lambda	Gamma	
3	Air Filter	Weibull 2	1.058	2513.02			Data Historis Perusahaan
4	Lube Oil Filter	Eksponensial			2.31E-06		Data Historis Perusahaan
5	Cooling Sealing Air	Weibull 2	1.107	2561.30			Data Historis Perusahaan
6	Comp. Pressure Indicator	Weibull 3	1.041	1093.82		172.6	Data Historis Perusahaan
7	Comp. Temperatu-re Indicator	Weibull 2	0.905	1021.34			Data Historis Perusahaan
COMBUSTOR							
8	Difuser	Eksponensial			4.46E-06		Data Historis Perusahaan
9	Seal Air Fan	Eksponensial			1.77E-06		Data Historis Perusahaan
10	Flame Detector	Eksponensial			5.34E-06		OREDA *Handbook*
11	Flame Detector	Eksponensial			5.34E-06		OREDA *Handbook*
12	Flame Detector	Eksponensial			5.34E-06		OREDA *Handbook*
13	Flame Detector	Eksponensial			5.34E-06		OREDA *Handbook*
14	Ignition Transform-er	Eksponensial			1.20E-07		Data Historis Perusahaan
15	Turbine Guide Vane	Weibull 2	0.681	793.12			Data Historis Perusahaan
TURBINE GAS							
16	Lube Oil Main Pump Drain	Eksponensial			0.0004		Data Historis Perusahaan

No	Nama Mesin	Hasil Fitting Distribusi	Parameter				Sumber Data
			Beta	Eta	Lambda	Gamma	
17	Oil Vapour Separator	Eksponensial			4.07E-06		Data Historis Perusahaan
18	Oil Vapour Separator	Eksponensial			3.07E-06		Data Historis Perusahaan
19	Compensat-or Hydraulic Oil Supply Pump	Weibull 2	1.021	2207.36			Data Historis Perusahaan
20	Fuel Gas	Weibull 2	1.244	3532.25			Data Historis Perusahaan
21	Turbine Air Inlet Filter Ctrl Press	Eksponensial			2.89E-06		Data Historis Perusahaan
22	Exhaust Fan A	Eksponensial			5.88E-06		Data Historis Perusahaan
23	Exhaust Fan B	Eksponensial			2.87E-06		Data Historis Perusahaan
24	Turbine Compartm-ent Fire Detector	Eksponensial			2.72E-06		Data Historis Perusahaan
POWER GENERATOR							
25	Stator Cooling Air Pump	Eksponensial			1.32E-06		Data Historis Perusahaan
26	Main Seal Oil Pump	Eksponensial			3.42E-06		Data Historis Perusahaan
27	AC Seal Oil Pump	Eksponensial			2.32E-06		Data Historis Perusahaan
28	DC Seal Oil Pump	Eksponensial			1.98E-06		Data Historis Perusahaan
29	H2 Cooler	Weibull 2	1.021	2207.36			Data Historis Perusahaan
30	Winding Generator Phase U	Eksponensial			3.55E-06		Data Historis Perusahaan

No	Nama Mesin	Hasil Fitting Distribusi	Parameter				Sumber Data
			Beta	Eta	Lambda	Gamma	
31	Winding Generator Phase V	Eksponensial			1.90E-06		Data Historis Perusahaan
32	Winding Generator Phase W	Eksponensial			3.77E-06		Data Historis Perusahaan
33	Generator Stator Core Temp. Detector	Weibull 2	1.244	3532.25			Data Historis Perusahaan
34	Generator Excitation	Eksponensial			8.21E-06		Data Historis Perusahaan

4.4 Pengolahan Data Metode Skalar

Pengolahan data metode skalar merupakan perhitungan keandalan sistem berdasarkan konfigurasi blok diagram keandalan sistem pembangkit listrik tenaga gas PT Pupuk Indonesia Energi. Tabel 4.2 merupakan rumus yang digunakan dalam perhitungan keandalan sistem berdasarkan konfigurasi struktur sistem.

Tabel 4. 2 Tabel Formula Perhitungan Keandalan Metode Skalar

No.	Struktur Sistem	Formula	
1.	Seri	$R_s(t) = \prod_{i=1}^{N} R_i(t)$	(57)
2.	Paralel	$R_s(t) = 1 - \prod_{i=1}^{N} (1 - R_i(t))$	(58)
3.	*K out of N*	$R_s(t) = \sum_{j=K}^{N} C(j,N) R_{(t)^j} \left(1 - R_{(t)}\right)^{N-j}$	(59)

Tabel 4.3 hingga Tabel 4.6 merupakan rekap hasil perhitungan keandalan sistem metode skalar dengan mengetahui keandalan dari masing-masing subsistem penyusunnya.

Tabel 4. 3 Rekap Hasil Perhitungan Keandalan Sistem pada *Compressor*

Compressor		R_Subsys	R(sys)
Kode Mesin	Nama Mesin		
01-LG-001	Screen Filter	0.8662	**0.022**
01-LT-001-A	Air Filter	0.7836	

Compressor		R_Subsys	R(sys)
Kode Mesin	**Nama Mesin**		
01-LT-001-B	Air Filter	0.7836	
01-LCV-001	Lube Oil Filter	0.8168	
01-LBK-001	Cooling Sealing Air	0.5010	
01-LDG-001	Comp. Pressure Indicator	0.3335	
01-LE-001	Comp. Temperature Indicator	0.2028	

Tabel 4.4 Rekap Hasil Perhitungan Keandalan Sistem pada *Combustor*

Combustor		R_Subsys	R(sys)
Kode Mesin	**Nama Mesin**		
01-BA-001	Difuser	0.9617	
01-BA-004	Seal Air Fan	0.9846	
01-BE-001-A	Flame Detector	0.9543	
01-BE-001-B	Flame Detector	0.9543	**0.107**
01-BE-001-C	Flame Detector	0.9543	
01-BE-001-D	Flame Detector	0.9543	
01-KE-001-A	Ignition Transformer	0.9999	
01-KA-001	Turbine Guide Vane	0.7158	

Tabel 4.5 Rekap Hasil Perhitungan Keandalan Sistem pada *Turbine Gas*

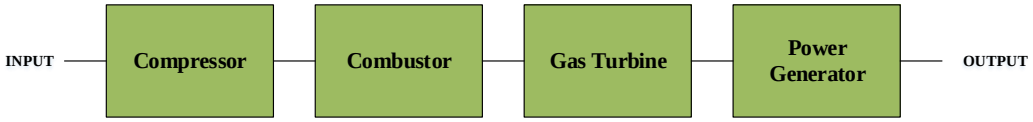
Gas Turbin		R_Subsys	R(sys)
Kode Mesin	**Nama Mesin**		
01-PCV-001	Lube Oil Main Pump Drain	0.3798	
01-PG-004	Oil Vapour Separator	0.9650	
01-PG-005	Oil Vapour Separator	0.9735	
01-PCV-003	Compensator Hydraulic Oil Supply Pump	0.2568	
01-FCV-002	Fuel Gas	0.3652	**0.034**
01-PDIT-012	Turbine Air Inlet Filter Ctrl Press	0.9922	
01-GD-001	Exhaust Fan A	0.9837	
01-GD-002	Exhaust Fan B	0.9838	
01-TSHH-009	Turbine Compartment Fire Detector	0.9850	

Tabel 4.6 Rekap Hasil Perhitungan Keandalan Sistem pada *Power Generator*

Power Generator		R_Subsys	R(sys)
Kode Mesin	**Nama Mesin**		
01-LSH-005	Stator Cooling Air Pump	0.8986	
01-LTY-006	Main Seal Oil Pump	0.9876	
01-TE-050	AC Seal Oil Pump	0.9799	
01-TE-052	DC Seal Oil Pump	0.9828	**0.175**
01-TE-053	H2 Cooler	0.5873	
01-RRP-07	Winding Generator Phase U	0.9865	

Power Generator		R_Subsys	R(sys)
Kode Mesin	**Nama Mesin**		
01-RTY-05	Winding Generator Phase V	0.7763	
01-RGU-08	Winding Generator Phase W	0.9933	
01-TYT-001	Generator Stator Core Temp. Detector	0.4687	
01-ZTY-002	Generator Excitation	0.9306	

Berdasarkan Tabel 4.3 diketahui bahwa nilai keandalan pada subsistem *air compressor* adalah 0.022. Tabel 4.4 menunjukkan bahwa nilai keandalan pada subsistem *combustor* adalah 0.107. Tabel 4.5 menunjukkan bahwa nilai keandalan pada subsistem *gas turbine* adalah 0.034. Tabel 4.6 menunjukkan bahwa nilai keandalan pada subsistem *power generator* adalah 0.175.



Gambar 4. 8 Blok Diagram Keandalan Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Gas
Sumber: PT Pupuk Indonesia Energi (2020)

Gambar 4.8 menunjukkan blok diagram keandalan pada proses pembangkit listrik tenaga gas PT Pupuk Indonesia Energi. Blok diagram keandalan tersebut terdiri atas 4 subsistem utama yaitu *compressor*, *combustor*, *gas turbine*, dan *power generator*. Berdasarkan Gambar 4.8 diketahui bahwa hubungan antar blok diagram adalah seri, sehingga nilai keandalan sistem pada proses pembangkit listrik tenaga gas PT Pupuk Indonesia Energi dapat diketahui dengan menggunakan rumus sebagai berikut.

$$R_s(t) = \prod_{i=1}^{N} R_i(t) \tag{60}$$

Tabel 4.7 Hasil Perhitungan Nilai Keandalan Sistem Kondisi Eksisting pada $t = 8760$ Metode Skalar

No.	Nama Subsistem	R_Subsys	R_Sys
1	Air Compressor	0.022	**1.49E-05**
2	Combustor	0.107	
3	Turbine Gas	0.034	
4	Power Generator	0.175	

Berdasarkan Tabel 4.7 diketahui bahwa nilai keandalan sistem proses pembangkit listrik tenaga gas pada PT Pupuk Indonesia Energi dengan metode skalar pada $t = 8760$ adalah 1.49E-05.

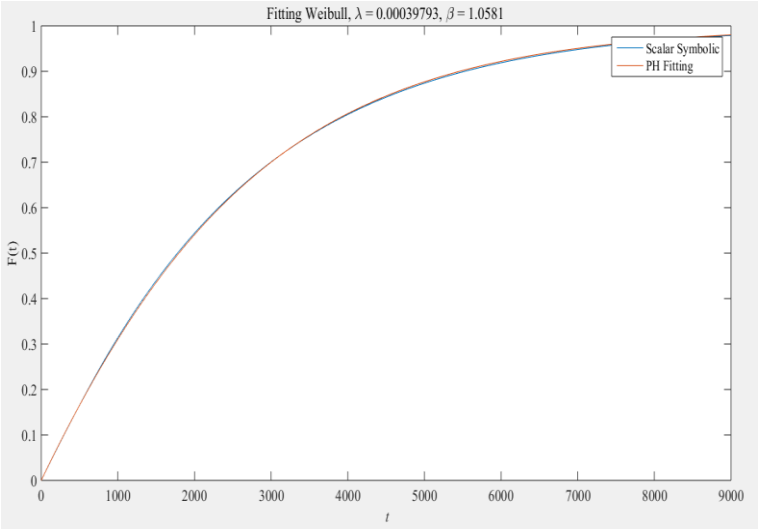
4.5 Pengolahan Data Metode *Phase-Type Distribution*

Pengolahan data dengan menggunakan metode distribusi PH diawali dengan menentukan nilai n, a, serta A pada setiap peralatan. Nilai n, a, serta A diperoleh berdasarkan hasil *fitting* distribusi asli dari data kerusakan peralatan ke distribusi PH. Tabel 4.8 hingga Tabel 4.11 merupakan tabel rekap nilai n, a, dan A yang merupakan representasi dari distribusi PH pada masing-masing peralatan.

Tabel 4.8 Rekap Representasi Distribusi PH pada Subsistem *Compressor*

No.	Nama Mesin	PH representation		
		n	a	A
1	Screen Filter	1	$[1]$	$[-0.00000164]$
2	Air Filter	3	$[0.8015, 0.1985, 0]$	$\begin{bmatrix} -0.0004354 & 0 & 0 \\ 0 & -0.0006534 & 0.0006534 \\ 0 & 0 & -0.0006534 \end{bmatrix}$
3	Air Filter	3	$[0.8015, 0.1985, 0]$	$\begin{bmatrix} -0.0004354 & 0 & 0 \\ 0 & -0.0006534 & 0.0006534 \\ 0 & 0 & -0.0006534 \end{bmatrix}$
4	Lube Oil Filter	1	$[1]$	$[-0.00000231]$
5	Cooling Sealing Air	3	$[0.6932, 0.3068, 0]$	$\begin{bmatrix} -0.0004331 & 0 & 0 \\ 0 & -0.0007287 & 0.0007287 \\ 0 & 0 & -0.0007287 \end{bmatrix}$
6	Comp. Pressure Indicator	2	$[0.5103, 0.4897]$	$\begin{bmatrix} -0.0008 & 0 \\ 0 & -0.0010 \end{bmatrix}$
7	Comp. Temperat-ure Indicator	3	$[0.9415, 0.0585, 0]$	$\begin{bmatrix} -0.0009 & 0 & 0 \\ 0 & -0.0066 & 0.0066 \\ 0 & 0 & -0.0066 \end{bmatrix}$

Gambar 4.9 merupakan contoh hasil grafik *fitting* distribusi data kerusakan ke dalam distribusi PH. Proses *fitting* dari distribusi kerusakan ke distribusi PH dilakukan dengan melakukan *input* berupa parameter distribusi kerusakan tersebut ke *software* Matlab. Pendekatan antara distribusi kerusakan ke distribusi PH dilakukan dengan melihat nilai CVTTF pada masing-masing peralatan. Kemudian lihat pada gambar grafik apakah garis distribusi PH sudah mendekati distribusi kerusakan, jika belum maka dapat dilakukan perubahan pada nilai n yang merupakan *state order* hingga grafik distribusi PH tepat atau mendekati grafik distribusi asli data kerusakan. Berdasarkan Gambar 4.9 diketahui bahwa distribusi PH mampu mendekati distribusi asli data kerusakan peralatan dengan jumlah $n = 3$. Untuk grafik *fitting* distribusi PH pada peralatan lainnya dapat dilihat pada lampiran A.



Gambar 4.9 Grafik CDF Hasil *Fitting* Distribusi Weibull Peralatan 01-LT-001-A ke Distribusi PH

Tabel 4.9 Rekap Nilai Representasi Distribusi PH pada Subsistem *Combustor*

Nama Mesin	**PH representation**		
	n	***a***	***A***
Difuser	1	[1]	[−0.00000446]
Seal Air Fan	1	[1]	[−0.00000177]
Flame Detector	1	[1]	[−0.00000534]
Flame Detector	1	[1]	[−0.00000534]

Nama Mesin	PH representation		
	n	a	A
Flame Detector	1	[1]	$[-0.00000534]$
Flame Detector	1	[1]	$[-0.00000534]$
Ignition Transfor-mer	1	[1]	$[-0.00000012]$
Turbine Guide Vane	4	$[0.1081, 0.4581, 0.3349, 0.00889]$	$\begin{bmatrix} -0.0003 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.0008 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0.0033 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0.0444 \end{bmatrix}$

Tabel 4.10 Rekap Representasi Distribusi PH pada Subsistem *Turbine Gas*

No.	Nama Mesin	PH representation		
		n	a	A
1	Lube Oil Main Pump Drain	1	[1]	$[-0.0004]$
2	Oil Vapour Separator	1	[1]	$[-0.00000407]$
3	Oil Vapour Separator	1	[1]	$[-0.00000307]$
4	Compensat-or Hydraulic Oil Supply Pump	3	$[0.8800, 0.1200, 0]$	$\begin{bmatrix} -0.0004 & 0 & 0 \\ 0 & -0.0016 & 0.00166 \\ 0 & 0 & -0.0016 \end{bmatrix}$
5	Fuel Gas	3	$[0.3847, 0.6153, 0]$	$\begin{bmatrix} -0.00035 & 0 & 0 \\ 0 & -0.00055 & 0.00055 \\ 0 & 0 & -0.00055 \end{bmatrix}$
6	Turbine Air Inlet Filter Ctrl Press	1	[1]	$[-0.00000289]$
7	Exhaust Fan A	1	[1]	$[-0.00000588]$
8	Exhaust Fan B	1	[1]	$[-0.00000287]$
9	Turbine Compartm-ent Fire Detector	1	[1]	$[-0.00000272]$

Tabel 4.11 Rekap Representasi Distribusi PH pada Subsistem *Power Generator*

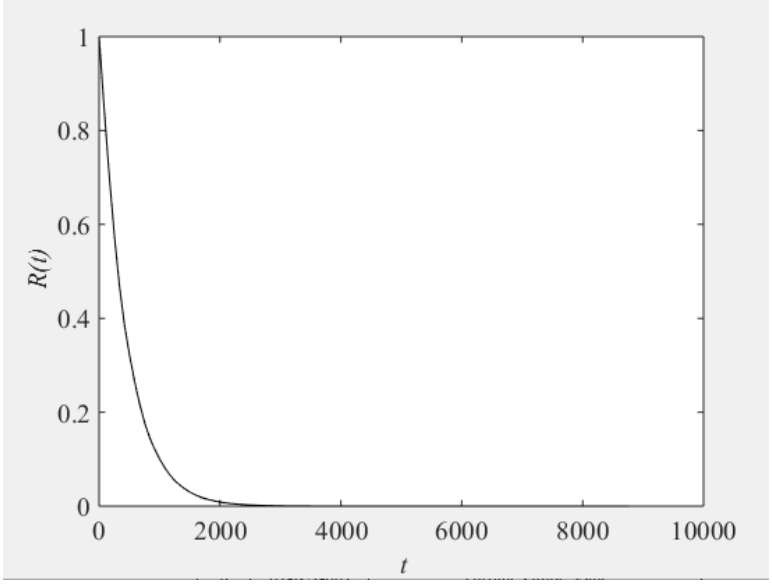
No.	Nama Mesin	PH representation		
		n	a	A
1	Stator Cooling Air Pump	1	$[1]$	$[-0.00000132]$
2	Main Seal Oil Pump	1	$[1]$	$[-0.00000342]$
3	AC Seal Oil Pump	1	$[1]$	$[-0.00000232]$
4	DC Seal Oil Pump	1	$[1]$	$[-0.00000198]$
5	H2 Cooler	3	$[0.8800, 0.1200, 0]$	$\begin{bmatrix} -0.0004 & 0 & 0 \\ 0 & -0.0016 & 0.00166 \\ 0 & 0 & -0.0016 \end{bmatrix}$
6	Winding Generator Phase U	1	$[1]$	$[-0.00000355]$
7	Winding Generator Phase V	1	$[1]$	$[-0.0000019]$
8	Winding Generator Phase W	1	$[1]$	$[-0.00000377]$
9	Generator Stator Core Temp. Detector	3	$[0.3847, 0.6153, 0]$	$\begin{bmatrix} -0.00035 & 0 & 0 \\ 0 & -0.00055 & 0.00055 \\ 0 & 0 & -0.00055 \end{bmatrix}$
10	Generator Excitation	1	$[1]$	$[-0.00000821]$

Setelah diketahui nilai n, a, dan A yang merupakan representasi dari distribusi PH pada masing-masing mesin, maka dilakukan perhitungan keandalan sistem metode distribusi PH dengan bantuan *software* Matlab. Tabel 4.12 merupakan rekap hasil perhitungan keandalan sistem dengan metode distribusi PH.

Tabel 4.12 Rekap Hasil Perhitungan Keandalan Sistem Metode Distribusi PH pada Subsistem *Compressor*

NO.	KODE	SUBSISTEM	R_Subsys	h_Subsys
1	01-LG-001	Screen Filter	**0.022**	**7.35E-05**
2	01-LT-001-A	Air Filter		
3	01-LT-001-B	Air Filter		
4	01-LCV-001	Lube Oil Filter		
5	01-LBK-001	Cooling Sealing Air		
6	01-LDG-001	Comp. Pressure Indicator		
7	01-LE-001	Comp. Temperature Indicator		

Berdasarkan Tabel 4.12 diketahui bahwa nilai keandalan pada subsistem *compressor* adalah 0.022. Selain itu diketahui pula bahwa nilai *hazard rate* subsistem *compressor* adalah 0.0000735. Gambar 4.10 merupakan grafik dari *reliability function* pada subsistem *compressor*.

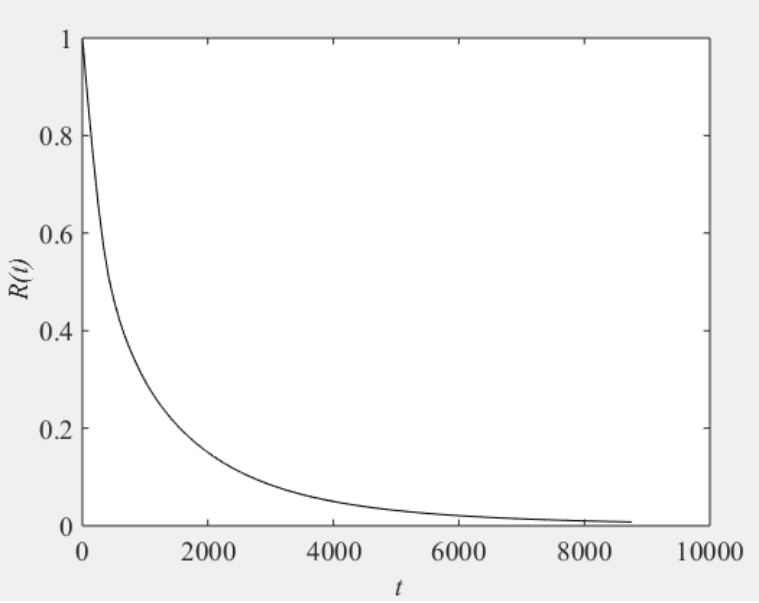


Gambar 4. 10 Grafik *Reliability Function* pada Subsistem *Compressor*

Tabel 4.13 Rekap Hasil Perhitungan Keandalan Sistem Distribusi PH pada *Combustor*

NO.	KODE	SUBSISTEM	R_Subsys	h_Subsys
1	01-BA-001	Difuser	**0.107**	**1.67E-04**
2	01-BA-004	Seal Air Fan		
3	01-BE-001-A	Flame Detector		
4	01-BE-001-B	Flame Detector		
5	01-BE-001-C	Flame Detector		
6	01-BE-001-D	Flame Detector		
7	01-KE-001-A	Ignition Transformer		
8	01-KA-001	Turbine Guide Vane		

Berdasarkan Tabel 4.13 diketahui bahwa nilai keandalan pada subsistem *combustor* adalah 0.107. Selain itu diketahui pula bahwa nilai *hazard rate* subsistem *combustor* adalah 0.000166. Gambar 4.11 merupakan grafik dari *reliability function* pada subsistem *combustor*.

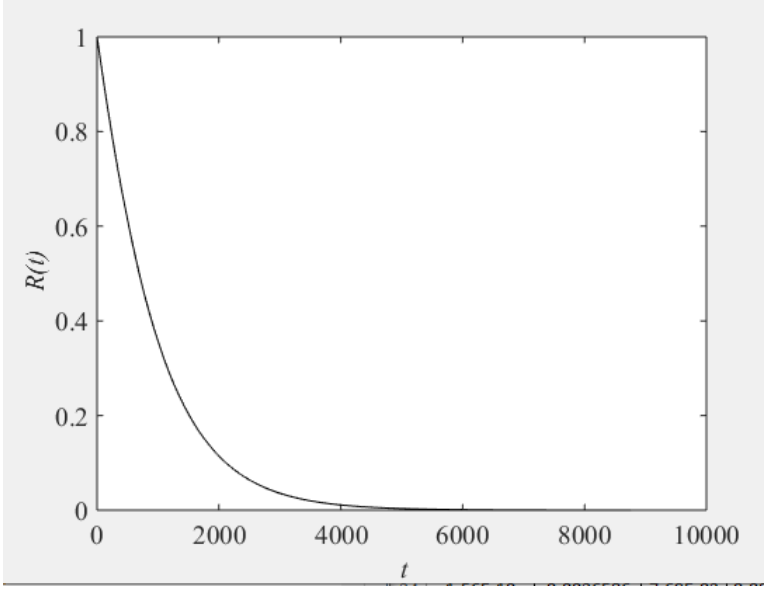


Gambar 4.11 Grafik *Reliability Function* pada Subsistem *Combustor*

Tabel 4. 14 Rekap Hasil Perhitungan Keandalan Sistem Distribusi PH pada *Turbine Gas*

NO.	KODE	SUBSISTEM	R_Subsys	h_Subsys
1	01-PCV-001	Lube Oil Main Pump Drain	**0.034**	**7.23E-05**
2	01-PG-004	Oil Vapour Separator		
3	01-PG-005	Oil Vapour Separator		
4	01-PCV-003	Compensator Hydraulic Oil Supply Pump		
5	01-FCV-002	Fuel Gas		
6	01-PDIT-012	Turbine Air Inlet Filter Ctrl Press		
7	01-GD-001	Exhaust Fan A		
8	01-GD-002	Exhaust Fan B		
9	01-TSHH-009	Turbine Compartment Fire Detector		

Berdasarkan Tabel 4.14 diketahui bahwa nilai keandalan pada subsistem *turbine gas* adalah 0.034. Selain itu diketahui pula bahwa nilai *hazard rate* subsistem *turbine gas* adalah 0.0000723. Gambar 4.12 merupakan grafik dari *reliability function* pada subsistem *turbine gas.*

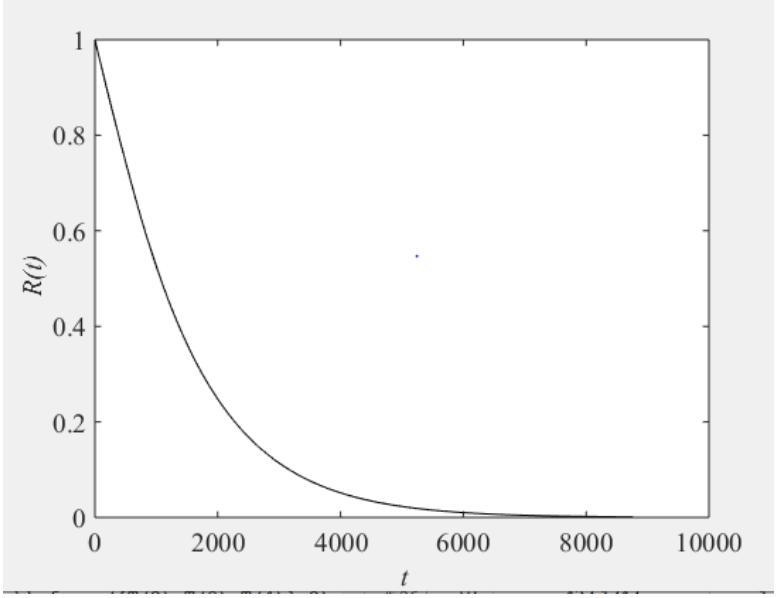


Gambar 4. 12 Grafik *Reliability Function* pada Subsistem *Turbine Gas*

Tabel 4. 15 Rekap Hasil Perhitungan Keandalan Sistem Distribusi PH pada *Power Generator*

NO.	KODE	SUBSISTEM	R_Subsys	h_Subsys
1	01-LSH-005	Stator Cooling Air Pump	**0.175**	**4.74E-03**
2	01-LTY-006	Main Seal Oil Pump		
3	01-TE-050	AC Seal Oil Pump		
4	01-TE-052	DC Seal Oil Pump		
5	01-TE-053	H2 Cooler		
6	01-RRP-07	Winding Generator Phase U		
7	01-RTY-05	Winding Generator Phase V		
8	01-RGU-08	Winding Generator Phase W		
9	01-TYT-001	Generator Stator Core Temp. Detector		
10	01-ZTY-002	Generator Excitation		

Berdasarkan Tabel 4.15 diketahui bahwa nilai keandalan pada subsistem *power generator* adalah 0.175. Selain itu diketahui pula bahwa nilai *hazard rate* subsistem *power generator* adalah 0.004744. Gambar 4.13 merupakan grafik dari *reliability function* pada subsistem *power generator*.

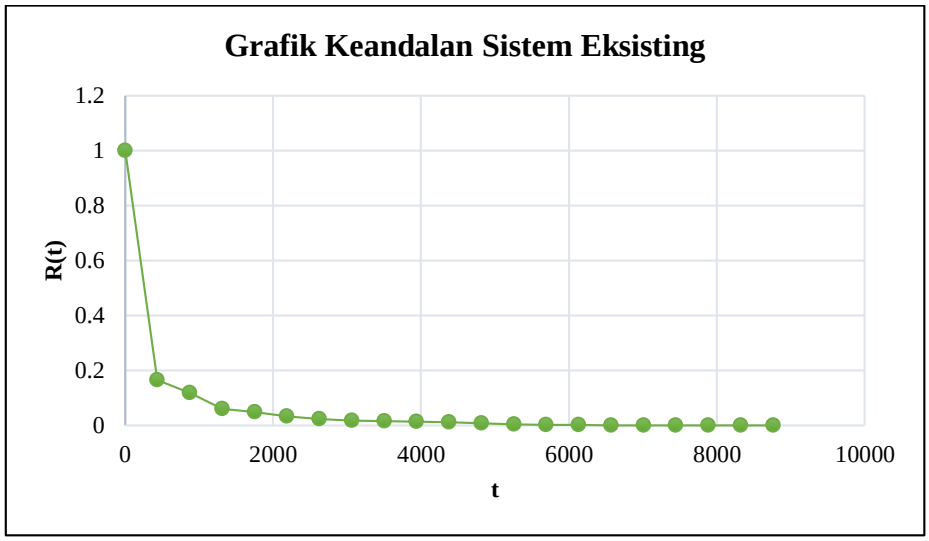


Gambar 4.13 Grafik *Reliability Function* pada Subsistem *Power Generator*

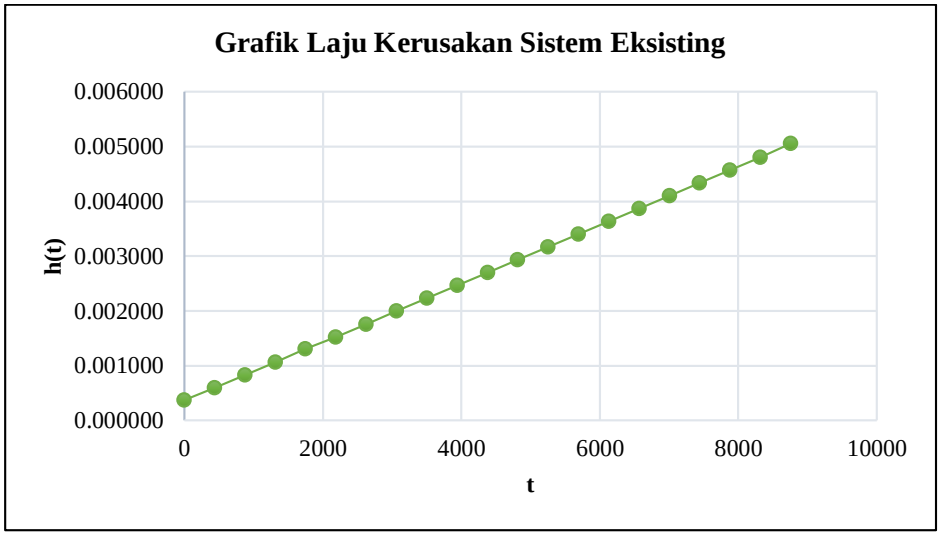
Tabel 4.16 Rekap Hasil Perhitungan Keandalan Sistem Eksisting Metode Distribusi PH pada $t = 8760$

No.	Nama Subsistem	R_Subsys	R_Sys	h_Subsys	h_Sys
1	Air Compressor	0.022	**1.49E-05**	0.000073	**0.00505**
2	Combustor	0.107		0.00016	
3	Turbine Gas	0.034		0.000072	
4	Power Generator	0.175		0.0047	

Berdasarkan Tabel 4.16 diketahui bahwa nilai perhitungan keandalan sistem pada proses pembangkit listrik tenaga gas PT Pupuk Indonesia Energi dengan pendekatan distribusi PH adalah 1.49E-05. Selain itu diketahui pula laju kerusakan sistem dengan pendekatan distribusi PH adalah 0.00505. Gambar 4.14 merupakan grafik keandalan sistem pembangkit listrik tenaga gas PT Pupuk Indonesia Energi dengan pendekatan distribusi PH pada $t = 0$ hingga $t = 8760$ (1 tahun). Sedangkan Gambar 4.15 merupakan grafik laju kerusakan sistem pembangkit listrik tenaga gas PT Pupuk Indonesia Energi dengan pendekatan distribusi PH pada $t = 0$ hingga $t = 8760$.



Gambar 4.14 Grafik Keandalan Sistem Eksisting pada t = 0 hingga t = 8760



Gambar 4.15 Grafik Laju Kerusakan Eksisting pada t = 0 hingga t = 8760

4.6 Penentuan Subsistem dan Peralatan Kritis dengan *Birnbaun Index*

Untuk meningkatkan keandalan sistem perlu mengetahui subsistem mana yang paling mempengaruhi keandalan sistem. Subsistem ini merupakan subsistem yang kritikal. Terdapat beberapa metode indeks *reliability importance* dalam menentukan subsistem kritikal dalam suatu sistem, salah satunya adalah *Birnbaun Index*. Tabel 4.17 merupakan rekap data yang dibutuhkan dalam penentuan subsistem kritis pada sistem pembangkit listrik tenaga gas PT Pupuk Indonesia Energi dengan metode *Birnbaun Index*.

$t = 8760$

$q_1 = 1 - R_1(t) = 0.9771$

$q_2 = 1 - R_2(t) = 0.8923$

$q_3 = 1 - R_3(t) = 0.9652$

$q_4 = 1 - R_4(t) = 0.8249$

Tabel 4. 17 Rekap Perhitungan q Subsistem Kritis *Birnbaun Index*

No.	Nama Subsistem	$R(t)$	q
1	Air compressor	2.29E-02	0.9771
2	Combustor	1.08E-01	0.8923
3	Turbine Gas	3.48E-02	0.9652
4	Power Generator	1.75E-01	0.8249

Berdasarkan Gambar 4.2 diketahui bahwa sistem pembangkit listrik tenaga gas PT Pupuk Indonesia Energi terhubung secara seri, sehingga rumus yang digunakan dalam menentukan subsistem kritis dengan *Birnbaun Index* adalah:

$$G\ (q) = 1 - (1 - q_1)(1 - q_2)(1 - q_3)(1 - q_4) \quad (60)$$

Tabel 4.18 merupakan rekap perhitungan yang digunakan dalam penentuan subsistem kritis dengan metode *Birnbaun Index*.

$I_B^1(8760) = \ (1 - q_2)(1 - q_3)(1 - q_4) = 6.55E - 04$

$I_B^2(8760) = \ (1 - q_1)(1 - q_3)(1 - q_4) = 1.39E - 04$

$I_B^3(8760) = \ (1 - q_1)(1 - q_2)(1 - q_4) = 4.31E - 04$

$I_B^4(8760) = \ (1 - q_1)(1 - q_2)(1 - q_3) = 8.55E - 05$

Tabel 4. 18 Rekap Penentuan Subsistem Kritis dengan *Birnbaun Index*

No.	Nama Subsistem	$R(t)$	q	I
1	Air compressor	2.29E-02	0.9771	6.55E-04
2	Combustor	1.08E-01	0.8923	1.39E-04
3	Turbine Gas	3.48E-02	0.9652	4.31E-04
4	Power Generator	1.75E-01	0.8249	8.55E-05

Berdasarkan Tabel 4.18 diketahui bahwa *air compressor* dan *turbine gas* memiliki nilai *importance index* tertinggi jika dibandingkan subsistem lainnya yaitu 0.00065 dan 0.00043. Hasil perhitungan tersebut menunjukkan bahwa subsistem *air compressor* dan *turbine gas* adalah subsistem yang kritis dan memiliki pengaruh yang besar terhadap keandalan sistem pembangkit listrik tenaga gas PT Pupuk Indonesia Energi sehingga diperlukan skenario perbaikan terhadap konfigurasi struktur pada subsistem *air compressor* dan *turbine gas* untuk meningkatkan keandalan sistem pembangkit listrik tenaga gas PT Pupuk Indonesia Energi.

Setelah mengetahui subsistem yang memiliki pengaruh besar dalam keandalan sistem, perlu diketahui pula peralatan-peralatan yang memiliki pengaruh pada keandalan subsistem kritis tersebut. Peralatan-peralatan kritis ini yang akan menjadi pertimbangan dalam perancangan skenario perbaikan. Tabel 4.19 dan Tabel 4.20 merupakan rekap perhitungan yang digunakan dalam penentuan peralatan kritis pada kedua subsistem kritis.

Tabel 4.19 Rekap Penentuan Peralatan Kritis pada Subsistem *Air Compressor*

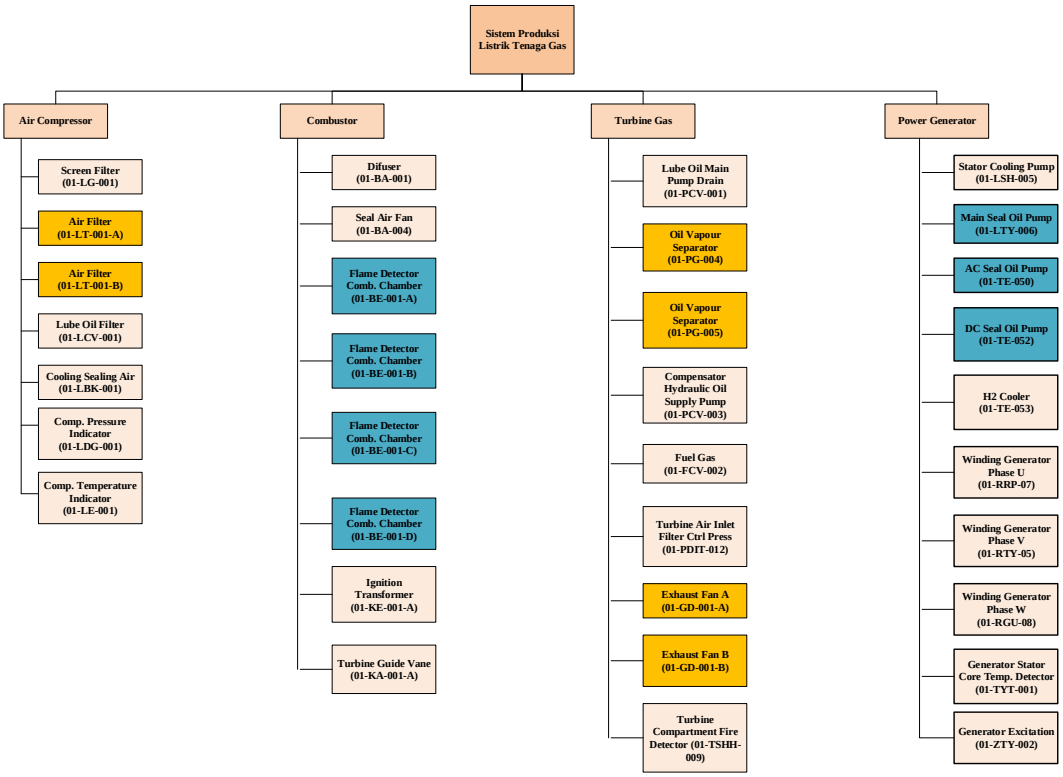
No.	Nama Peralatan	R_Peralatan	*Importance Index*_Peralatan	*Importance Index*_Subsistem
1	Screen Filter	0.8662	3.87E-05	**0.000655417**
2	Air Filter	0.7836	6.57E-04	
3	Air Filter	0.7836	6.57E-04	
4	Lube Oil Filter	0.8168	3.98E-05	
5	Cooling Sealing Air	0.5010	7.55E-03	
6	Comp. Pressure Indicator	0.3335	3.42E-03	
7	Comp. Temperature Indicator	0.2028	2.89E-02	

Berdasarkan Tabel 4.19 diketahui bahwa peralatan kritis pada subsistem *air compressor* adalah *cooling sealing air*, *comp. pressure indicator*, dan *comp. temperature indicator*. Hal ini disebabkan ketiga peralatan tersebut memiliki nilai *importance index* tertinggi jika dibandingkan dengan peralatan lainnya sehingga diperlukan peningkatan keandalan sistem dilakukan pada peralatan kritis tersebut.

Tabel 4.20 Rekap Penentuan Peralatan Kritis pada Subsistem *Turbine Gas*

No.	Nama Peralatan	R_Peralatan	*Importance Index*_Peralatan	*Importance Index*_Subsistem
1	Lube Oil Main Pump Drain	0.3798	3.86E-03	**0.000430838**
2	Oil Vapour Separator	0.9650	8.84E-05	
3	Oil Vapour Separator	0.9735	8.89E-05	
4	Compensator Hydraulic Oil Supply Pump	0.2568	3.15E-03	
5	Fuel Gas	0.3652	3.78E-03	
6	Turbine Air Inlet Filter Ctrl Press	0.9922	9.95E-05	
7	Exhaust Fan A	0.9837	9.50E-05	
8	Exhaust Fan B	0.9838	9.56E-05	
9	Turbine Compartment Fire Detector	0.9850	9.77E-05	

Berdasarkan Tabel 4.20 diketahui bahwa peralatan kritis pada subsistem *turbine gas* adalah *lube oil main pump drain, compensator hydraulic oil supply pump*, dan *fuel gas*. Hal ini disebabkan ketiga peralatan tersebut memiliki nilai *importance index* tertinggi jika dibandingkan dengan peralatan lainnya sehingga diperlukan peningkatan keandalan sistem dilakukan pada peralatan kritis tersebut.



Gambar 4. 16 Hierarki Keandalan Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Gas
Sumber: PT Pupuk Indonesia Energi (2020)

Keterangan:

: $k\ out\ of\ N$

: paralel

: seri

Berdasarkan Gambar 4.16 diketahui bahwa nilai keandalan sistem pembangkit listrik tenaga gas diperoleh berdasarkan nilai keandalan subsistem penyusunnya. Hasil perhitungan yang dilakukan dengan metode *Birnbaun Index* dalam menentukan subsistem kritis menunjukkan bahwa subsistem kritis pada sistem pembangkit listrik tenaga gas PT Pupuk Indonesia Energi adalah subsistem

air compressor dan subsistem *turbine gas*, sehingga kedua subsistem tersebut yang memiliki pengaruh besar dalam keandalan sistem dan menjadi pertimbangan dalam peningkatan keandalan sistem. Maka walaupun nilai keandalan dari masing-masing peralatan pada subsistem *combustor* dan subsistem *power generator* memiliki nilai *importance index* tertinggi, peningkatan pada peralatan-peralatan pada subsistem non-kritikal tidak memiliki pengaruh yang signifikan karena keandalan sistem tidak tergantung pada keandalan subsistem non-kritikal.

BAB 5
ANALISIS KEANDALAN SISTEM DAN USULAN PERBAIKAN SISTEM

Pada bab ini akan dilakukan analisis terhadap keandalan sistem pembangkit listrik tenaga gas kondisi eksisting. Selain itu dilakukan pula analisis perbandingan nilai MTTF dan CVTTF pada sistem eksisting, analisis sensitivitas untuk melihat pengaruh konfigurasi struktur sistem dan pengaruh penggantian mesin terhadap keandalan sistem, serta perancangan dan analisis skenario perbaikan.

5.1 Analisis Keandalan Sistem Eksisting

Analisis keandalan sistem eksisting merupakan analisis yang didasarkan atas hasil perhitungan keandalan sistem sesuai dengan konfigurasi struktur sistem pembangkit listrik tenaga gas PT Pupuk Indonesia Energi (data P&ID perusahaan). Data yang digunakan dalam proses perhitungan keandalan sistem adalah data kerusakan peralatan perusahaan periode 2017 hingga 2019. Perhitungan keandalan sistem kondisi eksisting dilakukan dengan dua metode, yaitu metode skalar dan metode pendekatan distribusi PH.

Pada perhitungan keandalan sistem dengan metode skalar dilakukan atas dasar distribusi kerusakan masing-masing subsistem penyusunnya. Perhitungan keandalan sistem dengan metode skalar menghasilkan nilai keandalan sistem sebesar 1.49E-05 pada $t = 8760$ jam (1 tahun). Kelemahan dari perhitungan metode skalar ini adalah sulit menghitung keandalan sistem dengan berbagai macam fungsi dari distribusi subsistem penyusunnya. Selain itu, dengan metode skalar kita tidak bisa melihat daerah-daerah kritis sehingga tidak dapat menentukan waktu yang tepat untuk melakukan *maintenance*.

Sementara itu pada perhitungan keandalan sistem dengan metode pendekatan distribusi PH pada $t = 8760$ dihasilkan nilai keandalan sistem sebesar 1.49E-05. Dalam waktu 1 tahun ($t = 8760\, jam$) probabilitas sistem dapat beroperasi sesuai fungsinya sangat kecil hingga mendekati nol, selebihnya sistem berada dalam kondisi gagal beroperasi. Nilai keandalan sistem yang dihasilkan dengan pendekatan distribusi PH tidak berbeda dengan nilai keandalan sistem yang

dihasilkan dengan metode skalar. Hal ini disebabkan oleh salah satu kemampuan distribusi PH yang mampu merepresentasikan berbagai distribusi acak sehingga hasil perhitungan antara metode skalar dengan metode pendekatan distribusi PH tidak berbeda. Selain itu, distribusi PH juga memiliki *closure properties* yang mampu memudahkan dalam perhitungan operasi campuran. Namun, distribusi PH juga memiliki kelemahan yaitu semakin tinggi kompleksitas sistemnya maka semakin besar pula jumlah orde matriks yang dihasilkan, sehingga proses komputasi yang lama dan membutuhkan spesifikasi memori laptop yang sangat besar. Hal ini disebabkan karena distribusi PH strukturnya adalah sebuah matriks dan dalam operasinya menggunakan *Kronecker* (matriks dalam matriks).

Jika dilihat dari Gambar 4.14 yang merupakan grafik keandalan sistem eksisting dengan pendekatan distribusi PH diketahui bahwa keandalan mengalami penurunan secara tajam pada $t = 438$ jam atau 18 hari dimana pada waktu tersebut nilai keandalan sistem adalah 0.16, sehingga dibutuhkan *preventive maintenance* setiap 2 minggu sekali untuk menjaga keandalan sistem. Diketahui pula bahwa seiring berjalannya waktu nilai keandalan sistem kondisi eksisting terus mengalami penurunan hingga $t = 8760$ jam(1 tahun).

Keunggulan lain dari distribusi PH adalah mampu memudahkan dalam perhitungan parameter keandalan sistem lainnya yaitu laju kerusakan. Laju kerusakan sistem kondisi eksisting yang dihasilkan dengan pendekatan distribusi PH sebesar 0.00505. Berdasarkan Gambar 4.15 yang merupakan grafik laju kerusakan sistem eksisting, laju kerusakan sistem mengalami kenaikan hingga pada $t = 8760$ jam (1 tahun). Dalam keandalan, laju kerusakan yang mengalami kenaikan dikenal dengan *increasing failure rate* (IFR) atau *wear-out period*. Laju kerusakan mengalami kenaikan disebabkan oleh beberapa faktor seperti kurangnya perawatan, korosi, penuaan, dan lainnya. Cara untuk meminimalisir dampak pada *wear-out period* adalah dengan melakukan *preventive maintenance* secara periodik dan mempertimbangkan adanya penggantian peralatan.

Salah satu tujuan dari analisis keandalan sistem adalah untuk identifikasi kelemahan sistem dan mengetahui langkah-langkah yang harus dilakukan untuk meningkatkan keandalan sistem tersebut. Dalam hal ini digunakan indeks *reliability importance* untuk menentukan subsistem mana yang berpengaruh terhadap

kegagalan sistem tersebut. Berdasarkan perhitungan dalam penentuan subsistem kritis dengan metode Birnbaun Index yang dilakukan pada subbab 4.6, diketahui bahwa subsistem *air compressor* dan *turbine gas* memiliki nilai *importance index* tertinggi jika dibandingkan dengan subsistem lainnya. Selain itu, *air compressor* dan *turbine gas* juga memiliki nilai keandalan lebih rendah jika dibandingkan dengan subsistem lainnya. Sehingga dapat disimpulkan bahwa subsistem *air compressor* dan *turbine gas* merupakan subsistem kritikal dan memiliki pengaruh besar dalam keandalan sistem pembangkit listrik tenaga gas PT Pupuk Indonesia Energi.

5.2 Analisis Perbandingan MTTF dan CVTTF Sistem Eksisting

Menurut Assaf & Levikson (1982), salah satu keunggulan distribusi PH adalah mampu mengurangi kebutuhan dari *numerical integration* menjadi *numerical algebra* dan menghasilkan solusi pada *algrebaic expressions* secara sederhana untuk menemukan parameter pada sistem stokastik, sehingga perhitungan MTTF dan CVTTF akan lebih mudah dilakukan. Dengan demikian diketahui bahwa suatu fungsi keandalan sistem akan menghasilkan momen statistik dengan lebih mudah. Tabel 5.1 merupakan rekap perbadingan nilai MTTF dan CVTTF pada masing-masing peralatan. Perbandingan dilakukan pada MTTF dan CVTTF berdasarkan data *time to failure*, skalar, dan matriks. MTTF dan CVTTF skalar dan matriks diperoleh dengan bantuan *software* Matlab dengan pendekatan distribusi PH.

Tabel 5.1 Rekap Perbandingan MTTF dan CVTTF Sistem Eksisting Metode Skalar dengan Metode Matriks (Distribusi PH)

NO	Nama Peralatan	Skalar		Matriks	
		MTTF	CVTTF	MTTF	CVTTF
1	Screen Filter	14812.37	1	14812.37	1
2	Air Filter	2457.80	0.95	2448.30	0.94
3	Air Filter	2457.80	0.95	2448.30	0.94
4	Lube Oil Filter	14269.57	1.00	14269.57	1
5	Cooling Sealing Air	2465.70	0.90	2442.40	0.91
6	Comp. Pressure Indicator	1076.30	0.96	1107.90	1.02
7	Comp. Temperature Indicator	1071.00	1.11	1069.10	1.03
8	Difuser	15876.6	1	15876.6	1
9	Seal Air Fan	16134.56	1	16134.56	1
10	Flame Detector	15589.74	1	15589.74	1

NO	Nama Peralatan	Skalar		Matriks	
		MTTF	CVTTF	MTTF	CVTTF
11	Flame Detector	15589.74	1	15589.74	1
12	Flame Detector	15589.74	1	15589.74	1
13	Flame Detector	15589.74	1	15589.74	1
14	Ignition Transformer	14812.37	1	14812.373	1
15	Turbine Guide Vane	1030.4	1.51	1017.5	1.55
16	Lube Oil Main Pump Drain	2389.0381	1	2389.0381	1
17	Oil Vapour Separator	15645.09	1	15645.09	1
18	Oil Vapour Separator	15894.35	1	15894.35	1
19	Compensator Hydraulic Oil Supply Pump	2188	0.98	2220.3	1.02
20	Fuel Gas	3293.2	0.81	3312.9	0.81
21	Turbine Air Inlet Filter Ctrl Press	2843.9	1.20	2836.4	1.17
22	Exhaust Fan A	16328.11	1	16328.11	1
23	Exhaust Fan B	16320.19	1	16320.19	1
24	Turbine Compartment Fire Detector	16453.04	1	16453.04	1
25	Stator Cooling Air Pump	14812.3728	1	14812.373	1
26	Main Seal Oil Pump	12672.45	1	12672.45	1
27	AC Seal Oil Pump	12082.04	1	12082.04	1
28	DC Seal Oil Pump	12487.67	1	12487.67	1
29	H2 Cooler	2188	0.98	2220.3	1.02
30	Winding Generator Phase U	12451.9	1	12451.9	1
31	Winding Generator Phase V	10453.27	1	10453.27	1
32	Winding Generator Phase W	13568.43	1	13568.43	1
33	Generator Stator Core Temp. Detector	3293.2	0.81	3312.9	0.81
34	Generator Excitation	11674.79	1	11674.79	1
MTTF Sistem (jam)		**674.43**		**693.61**	
CVTTF Sistem		**0.575**		**0.824**	

Berdasarkan Tabel 5.1 diketahui bahwa nilai MTTF (rata-rata waktu mesin mampu beroperasi sebelum terjadi kegagalan) skalar pada kondisi eksisting sistem pembangkit listrik tenaga gas PT Pupuk Indonesia Energi adalah 674.43 jam, sedangkan nilai MTTF matriks adalah 693.61 jam. *Mean time to failure* (MTTF) adalah salah satu parameter pengukuran untuk keandalan yang paling sering digunakan. *Mean time to failure* menunjukkan lama waktu suatu mesin atau sistem dapat beroperasi sebelum terjadi kegagalan (*failure*). Semakin tinggi nilai MTTF, maka nilai keandalan sistem juga tinggi. Sementara itu nilai CVTTF skalar adalah 0.575 dan nilai CVTTF matriks adalah 0.824. Hasil antara MTTF dan CVTTF skalar dengan MTTF dan CVTTF matriks tidak berbeda. Hal ini disebabkan oleh

kemampuan distribusi PH yang mampu mendekati distribusi asli data kerusakan peralatan.

Nilai MTTF juga dapat digunakan sebagai salah satu cara dalam penentuan alokasi waktu *maintenance* yang tepat sehingga peluang sistem dapat beroperasi tanpa kegagalan dapat meningkat. Dengan mengetahui nilai MTTF sistem, maka dapat dilakukan perhitungan *availability system* untuk melihat apakah sistem mampu mencapai *stream days* perusahaan (300 hari). Berikut merupakan perhitungan *availability system* dengan asumsi MTTR (*mean time to repair*) adalah deterministik yaitu 5 hari dengan menggunakan rumus seperti berikut:

Diketahui:

MTTF sistem = 698.61 jam (29 hari)

MTTR = 5 hari

$$Availability\ system = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR} \tag{61}$$

Maka:

$$Availability\ system = \frac{29}{29 + 5} = 85.25\%$$

$$Stream\ days = 300\ hari\ \times 85.25\% = 255\ hari$$

Berdasarkan perhitungan *availability system* diketahui bahwa *availability system* sebesar 85.25% namun dengan nilai *availability system* tersebut *stream days* saat ini mengalami penurunan selama 44 hari dari target *stream days* perusahaan selama 300 hari. Dengan demikian diperlukan *preventive maintenance* secara berkala untuk mengurangi *downtime* sehingga dapat meningkatkan *stream days* perusahaan.

5.3 Analisis Sensitivitas

Analisis sensitivitas merupakan analisis yang berkaitan dengan perubahan parameter untuk mengetahui seberapa sensitif suatu keputusan terhadap perubahan faktor-faktor yang mempengaruhinya. Pada penelitian ini, analisis sensitivitas dilakukan untuk mengetahui pengaruh dari perubahan variabel-variabel yang mempengaruhi performansi keandalan sistem pembangkit listrik tenaga gas. Variabel-variabel tersebut adalah konfigurasi struktur sistem dan penggantian

peralatan. Analisis sensitivitas dilakukan pada peralatan-peralatan kritikal pada subsistem kritikal yang telah ditentukan berdasarkan metode *Birbaun Index*, yaitu subsistem *air compressor* dan subsistem *turbine gas*. Analisis sensitivitas dilakukan pada $t = 720$ jam atau 1 bulan. Hal ini disebabkan oleh kurangnya kemampuan perhitungan keandalan sistem yang dilakukan pada $t = 8760$ jam (1 tahun) dalam menggambarkan *behavior system*, sehingga dilakukan perubahan pada nilai t. Selain itu perubahan nilai t dilakukan untuk melihat nilai keandalan sistem dalam waktu 1 bulan terkait dengan evaluasi perusahaan termasuk keandalan sistem yang diadakan setiap bulan.

5.3.1 Pengaruh Parallel Redundancy terhadap Keandalan Sistem

Penambahan peralatan dengan menerapkan *parallel redundancy* merupakan salah satu cara untuk meningkatkan keandalan sistem. Tabel 5.2 merupakan nilai keandalan sistem pada $t = 720$ jam (1 bulan) dengan melakukan penambahan peralatan dengan struktur *parallel* pada salah satu peralatan kritis di subsistem kritis. Pada subsistem *compressor*, peralatan kritis tersebut adalah *comp. temperature indicator*. Sementara itu pada subsistem *turbine gas*, peralatan kritis yang dimaksud adalah *compensator hydraulic supply pump*.

Tabel 5.2 Hasil Analisis Sensitivitas Pengaruh *Parallel Redundancy*

Subsistem Compressor (t=720)		
Jumlah Penambahan Peralatan	**R_Subsys**	**R_sys**
1	0.6832	0.27685
2	0.6971	0.28249
3	0.7107	0.28802
Subsistem Turbine Gas (t=720)		
Jumlah Penambahan Peralatan	**R_Subsys**	**R_sys**
1	0.7245	0.1997
2	0.7486	0.2063
3	0.7505	0.2069

5.3.2 Pengaruh Standby Redundancy dengan Perfect Switch terhadap Keandalan Sistem

Penambahan peralatan dengan menerapkan *standby redundancy* merupakan salah satu cara untuk meningkatkan keandalan sistem. Tabel 5.3

merupakan nilai keandalan sistem pada $t = 720$ jam (1 bulan) dengan melakukan penambahan peralatan dengan struktur *standby perfect switch* pada salah satu peralatan kritis di subsistem kritis. Pada subsistem *compressor*, peralatan kritis tersebut adalah *comp. temperature indicator*. Sementara itu pada subsistem *turbine gas*, peralatan kritis yang dimaksud adalah *compensator hydraulic supply pump*.

Tabel 5.3 Hasil Analisis Sensitivitas Pengaruh *Standby Redundancy Perfect Switch*

Subsistem Compressor (t=720)		
Jumlah Penambahan Peralatan	**R_Subsys**	**R_sys**
1	0.7682	0.311
2	0.7859	0.318
3	0.7934	0.322
Subsistem Turbine Gas (t=720)		
Jumlah Penambahan Peralatan	**R_Subsys**	**R_sys**
1	0.7734	0.2132
2	0.7895	0.2176
3	0.8047	0.2218

5.3.3 Pengaruh Penggantian Peralatan

Penggantian peralatan dengan nilai keandalan yang lebih baik akan memberikan dampak pada peningkatan keandalan sistem. Tabel 5.4 merupakan contoh penggantian peralatan kritis dengan beberapa nilai keandalan. Pada subsistem *compressor*, peralatan kritis tersebut adalah *comp. temperature indicator*. Sementara itu pada subsistem *turbine gas*, peralatan kritis yang dimaksud adalah *compensator hydraulic supply pump*.

Tabel 5.4 Hasil Analisis Sensitivitas Pengaruh Penggantian Peralatan

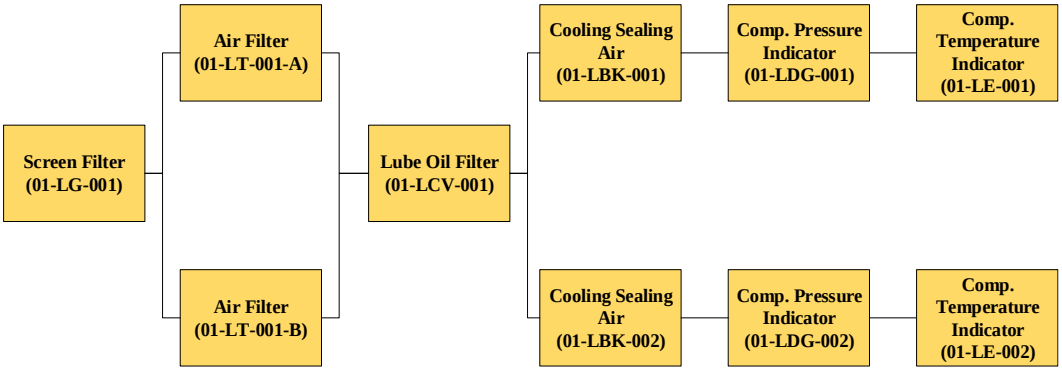
Subsistem Compressor (t=720)		
R_Peralatan	**R_Subsys**	**R_sys**
0.6851	0.7921	0.217
0.7194	0.8306	0.238
0.7305	0.8587	0.247
Subsistem Turbine Gas (t=720)		
R_Peralatan	**R_Subsys**	**R_sys**
0.7934	0.7734	0.1103
0.8346	0.7895	0.1248
0.8435	0.8154	0.1386

5.4 Perancangan dan Analisis Skenario Perbaikan

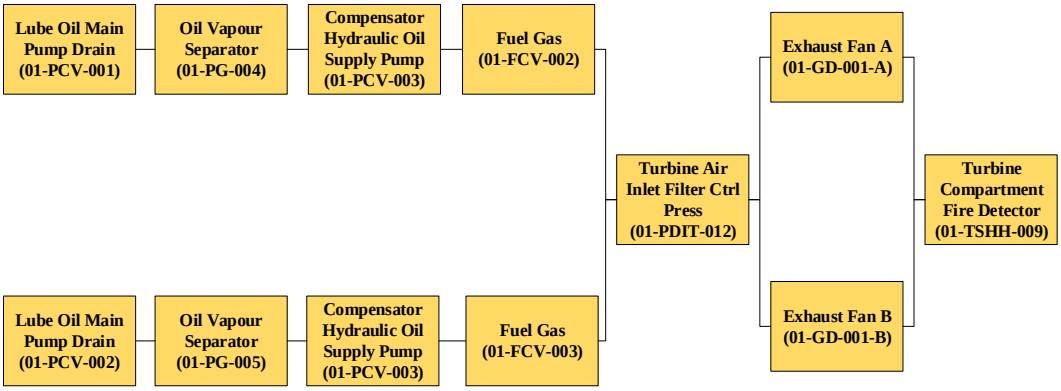
Perancangan skenario perbaikan untuk meningkatkan keandalan sistem didasarkan pada peralatan-peralatan kritis pada subsistem kritis. Hal ini disebabkan keandalan subsistem kritis memiliki pengaruh besar dalam keandalan sistem. Subsistem kritis tersebut adalah subsistem *air compressor* dan *turbine gas*.

5.4.1 Skenario 1 Perbaikan Sistem

Konfigurasi struktur merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi performansi keandalan sistem. Pada skenario 1 perbaikan sistem akan dibahas mengenai pengaruh perubahan konfigurasi struktur sistem pembangkit listrik tenaga gas dengan menerapkan sistem *parallel redundancy*. Gambar 5.1 dan Gambar 5.2 merupakan rancangan konfigurasi struktur perbaikan 1 pada subsistem *air compressor* dan *turbine gas* dengan menerapkan sistem *parallel redundancy*.



Gambar 5.1 Konfigurasi Struktur Perbaikan 1 Pada *Air Compressor*



Gambar 5.2 Konfigurasi Struktur Perbaikan 1 Pada *Turbine Gas*

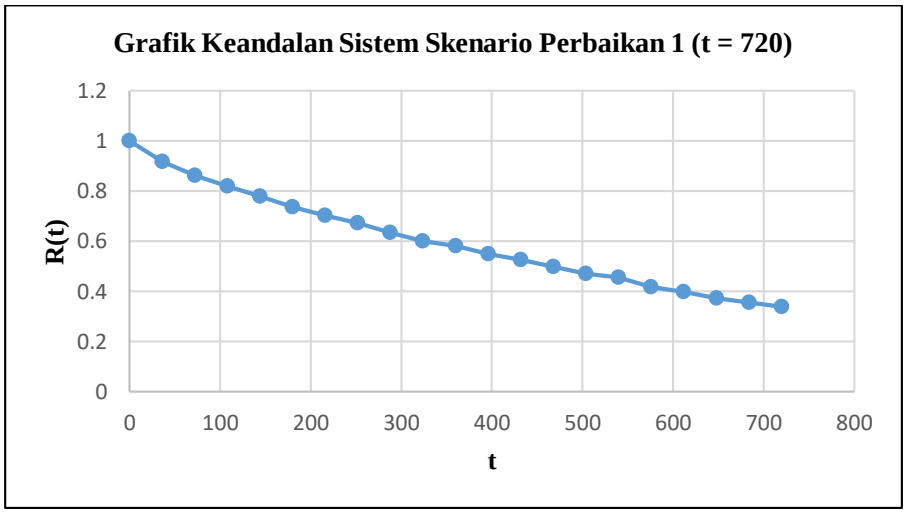
Konfigurasi struktur perbaikan dirancang atas dasar hubungan antar peralatan dalam membentuk suatu subsistem. Berdasarkan prosesnya, keseluruhan peralatan pada *air compressor* terhubung secara seri, kecuali *air filter*, *cooling sealing air*, *comp. pressure indicator*, dan *comp. temperature indicator* yang merupakan paralel. Gambar 5.1 merupakan konfigurasi struktur perbaikan 1 pada *air compressor* dengan menerapkan *parallel redundancy* terhadap 3 peralatan kritikal, yaitu *cooling sealing air*, *comp. pressure indicator*, dan *comp. temperature indicator*. Sedangkan pada Gambar 5.2 yang merupakan konfigurasi struktur perbaikan 1 pada *turbine gas* berdasarkan prosesnya, keseluruhan peralatan terhubung secara seri, kecuali *lube oil main pump drain*, *oil vapour separator*, *compensator hydraulic oil supply pump*, *fuel gas*, dan *exhaust fan*. Konfigurasi struktur perbaikan 1 pada *turbine gas* juga menerapkan *parallel redundancy* yang dilakukan pada 3 peralatan kritikal, yaitu *lube oil main pump drain*, *compensator hydraulic oil supply pump*, dan *fuel gas*.

Pada umumnya, untuk meningkatkan keandalan sistem pembangkit maka perlu disediakan *redundancy* pada peralatan-peralatan penyusun sistem. Hal ini berfungsi agar tidak mengganggu kelangsungan proses pembangkit listrik tenaga gas yang berjalan selama 24 jam. Proses pembangkit listrik termasuk dalam kategori proses kontinyu sehingga perusahaan akan mengalami kerugian besar jika prosesnya berhenti tanpa direncanakan atau sering mengalami *downtime*. Skenario perbaikan 1 merupakan hasil diskusi dengan salah satu *engineer* pihak PT Pupuk Indonesia Energi. Namun, untuk implementasi skenario perbaikan 1 ini diperlukan kajian kelayakan finansial lebih lanjut. Tabel 5.5 merupakan rekap hasil perhitungan keandalan sistem pembangkit listrik tenaga gas dengan skenario perbaikan 1. Nilai t yang digunakan adalah $t = 720$ (1 bulan).

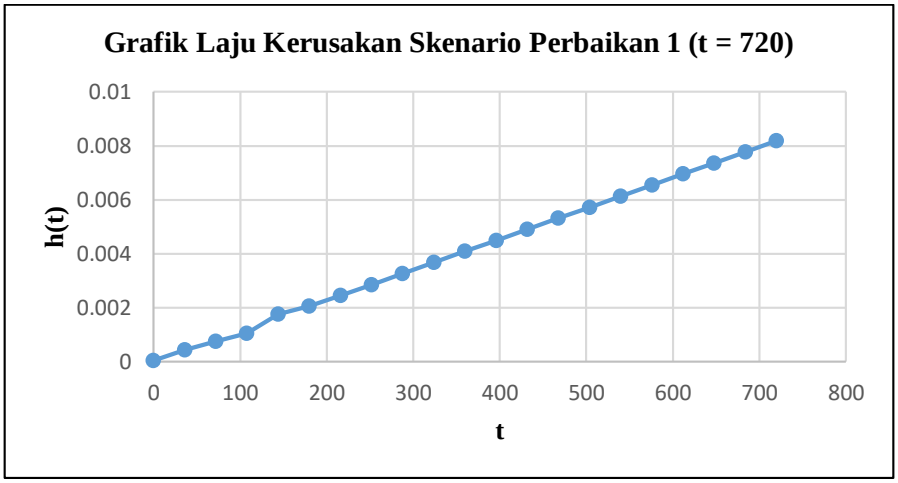
Tabel 5.5 Rekap Hasil Perhitungan Keandalan Sistem dengan Skenario Perbaikan 1 ($t = 720\ jam$)

Skenario Perbaikan 1 ($t = 720$)					
No.	**Nama Subsistem**	**R_Subsys**	**R(sys)**	**h_Subsys**	**h(sys)**
1	Air Compressor	0.71075	**0.337**	5.902E-05	**0.0081**
2	Combustor	0.69249		6.451E-06	
3	Turbine Gas	0.75055		0.0021328	
4	Power Generator	0.91306		0.0059844	

Berdasarkan Tabel 5.5 diketahui bahwa nilai keandalan sistem dengan skenario perbaikan 1 pada $t = 720$ jam adalah 0.337 dan nilai laju kerusakan sistem dengan skenario perbaikan 1 pada $t = 720$ jam adalah 0.0081. Gambar 5.3 merupakan grafik keandalan sistem dengan skenario perbaikan 1 pada $t = 720$ jam. Sementara itu Gambar 5.4 merupakan grafik laju kerusakan sistem dengan skenario perbaikan 1 pada $t = 720$ jam.



Gambar 5.3 Grafik Keandalan Sistem dengan Skenario Perbaikan 1 dengan $t = 720$ jam



Gambar 5.4 Grafik Laju Kerusakan Sistem dengan Skenario Perbaikan 1 pada $t = 720$ jam

Berdasarkan Gambar 5.3 diketahui bahwa dalam kurun waktu 1 bulan $(t = 720\ jam)$ terjadi penurunan keandalan sistem seiring dengan berjalannya waktu. Pada $t = 720$ jam nilai keandalan sistem dengan skenario perbaikan 1 adalah 0.337. Sementara itu berdasarkan Gambar 5.4 nilai laju kerusakan dengan skenario perbaikan 1 pada $t = 720$ jam adalah 0.0081. Jika dilihat dari Gambar 5.4 diketahui bahwa laju kerusakan skenario perbaikan 1 dengan $t = 0$ mengalami kenaikan hingga $t = 720$ jam. Selain dapat memudahkan dalam perhitungan keandalan sistem, distribusi PH juga mampu memudahkan dalam perhitungan MTTF sistem. MTTF merupakan salah satu pengukuran keandalan yang sering digunakan. Dengan skenario perbaikan 1 dihasilkan nilai MTTF sistem sebesar 1308.56 jam atau 54 hari. *Availability* sistem dengan skenario perbaikan 1 sebesar 91.60% dan *stream days* selama 274 hari.

Tabel 5.6 merupakan tabel perbandingan antara sistem eksisting dengan sistem perbaikan skenario 1 pada $t = 720$ jam. Berdasarkan Tabel 5.6 jika dibandingkan dengan sistem eksisting, diketahui bahwa terjadi penurunan laju kerusakan serta kenaikan pada *reliability system*, MTTF sistem, *availability system*, dan kenaikan pada *stream days*. Hal ini disebabkan oleh pengaruh penerapan *redundancy* pada peralatan-peralatan kritis pada subsistem kritis. Subsistem kritis ini memiliki pengaruh besar pada keandalan sistem, sehingga jika peningkatan keandalan dilakukan pada subsistem kritis maka keandalan sistem akan meningkat.

Selain mampu meningkatkan keandalan sistem, *redundancy* pada peralatan kritis juga mampu meningkatkan MTTF sistem, *availability system*, serta *stream days*.

Tabel 5.6 Perbandingan Sistem Eksisting dengan Skenario 1 pada $t = 720$ jam

Sistem Eksisting (t=720)				
Reliability System	***Hazard Rate***	**MTTF *System***	***Availability System***	***Stream Days***
0.12	7.00E-04	693.62	85.25%	255
Skenario Perbaikan 1 (t=720)				
Reliability System	***Hazard Rate***	**MTTF *System***	***Availability System***	***Stream Days***
0.3372	8.18E-03	1308.56	91.60%	274

5.4.2 Skenario 2 Perbaikan Sistem

Skenario perbaikan 2 merupakan rancangan perbaikan konfigurasi struktur dengan menerapkan *redundancy* pada subsistem kritis, yaitu subsistem *air compressor* dan subsistem *turbine gas*. Konfigurasi struktur perbaikan pada skenario 2 ini menerapkan sistem *standby redundancy* dengan *perfect switch* pada peralatan-peralatan yang kritis (memiliki *importance index* tertinggi) pada subsistem kritis. Pada peralatan yang tersusun secara *standby* dengan *perfect switch*, peralatan tambahan berada dalam keadaan *standby* dan siap akan mengambil alih ketika peralatan normal mengalami kegagalan. Untuk meningkatkan keandalan sistem maka perlu disediakan *redundancy* pada peralatan-peralatan penyusun sistem. Hal ini berfungsi agar tidak mengganggu kelangsungan proses pembangkit listrik yang berjalan selama 24 jam. Proses pembangkit listrik termasuk dalam kategori proses kontinyu, sehingga perusahaan akan mengalami kerugian besar jika prosesnya berhenti tanpa direncanakan atau sering mengalami *downtime*. Skenario perbaikan 2 juga merupakan hasil diskusi dengan *engineer* pihak PT Pupuk Indonesia Energi. Namun, untuk proses implementasi skenario perbaikan 2 ini diperlukan kajian kelayakan finansial lebih lanjut.

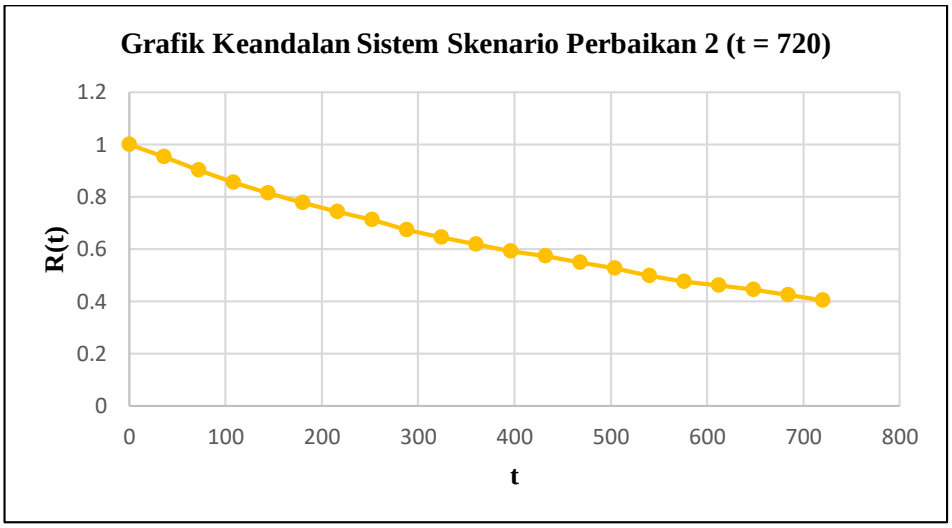
Pada subsistem *air compressor*, peralatan yang ditambahkan dan menjadi *standby perfect switch* adalah *cooling sealing air*, *comp. pressure indicator*, dan *comp. temperature indicator*. Sedangkan pada subsistem *turbine gas*, peralatan yang ditambahkan dan menjadi *standby perfect switch* adalah *lube oil main pump drain*, *compensator hydraulic oil supply pump*, dan *fuel gas*. Tabel 5.7 merupakan

rekap hasil perhitungan keandalan sistem pembangkit listrik tenaga gas dengan skenario perbaikan 2. Nilai t yang digunakan adalah $t = 720$ (1 bulan).

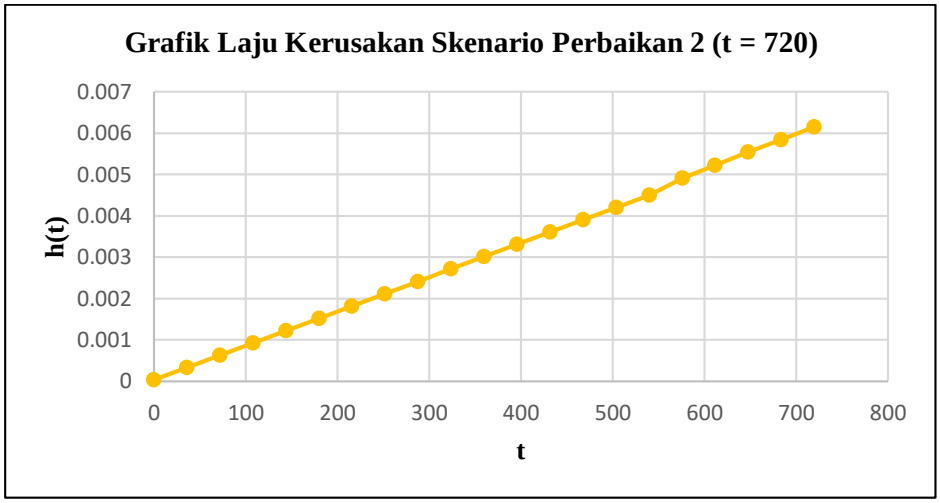
Tabel 5.7 Rekap Hasil Perhitungan Keandalan Sistem dengan Skenario Perbaikan 2 ($t = 720\ jam$)

Skenario Perbaikan 2 (t = 438)					
No.	**Nama Subsistem**	**R_Subsys**	**R(sys)**	**h_Subsys**	**h(sys)**
1	Air Compressor	0.79348	**0.403**	1.57686E-05	**0.006**
2	Combustor	0.6924914		6.4505E-06	
3	Turbine Gas	0.80479		0.000148362	
4	Power Generator	0.9130603		0.0059844	

Berdasarkan Tabel 5.7 diketahui bahwa nilai keandalan sistem dengan skenario perbaikan 2 pada $t = 720$ jam adalah 0.403 dan nilai laju kerusakan sistem dengan skenario perbaikan 2 pada $t = 720$ jam adalah 0.006. Nilai keandalan sistem dengan skenario 2 mengalami peningkatan jika dibandingkan dengan skenario 1. Gambar 5.5 merupakan grafik keandalan sistem dengan skenario perbaikan 2 pada $t = 720$ jam. Sedangkan Gambar 5.6 merupakan grafik laju kerusakan sistem dengan skenario perbaikan 2 pada $t = 720$ jam.



Gambar 5.5 Grafik Keandalan Sistem dengan Skenario Perbaikan 2 dengan $t = 720$ jam



Gambar 5.6 Grafik Laju Kerusakan Sistem dengan Skenario Perbaikan 2 pada $t = 720$ jam

Berdasarkan Gambar 5.5 diketahui bahwa dalam kurun waktu 1 bulan $(t = 720\ jam)$ terjadi penurunan keandalan sistem seiring dengan berjalannya waktu. Pada $t = 720$ jam nilai keandalan sistem dengan skenario perbaikan 2 adalah 0.403. Nilai keandalan sistem pada skenario perbaikan 2 mengalami peningkatan jika dibandingkan dengan skenario perbaikan 1. Hal ini disebabkan oleh pengaruh sistem *standby perfect switch* dimana tidak terdapat pembagian beban kerja (*sharing load*). Ketika peralatan A gagal, maka peralatan B langsung aktif dan *failure rate* peralatan B lebih kecil. Sementara itu berdasarkan Gambar 5.6 nilai laju kerusakan dengan skenario perbaikan 2 pada $t = 720$ jam adalah 0.006. Jika dilihat dari grafik laju kerusakan sistem dengan skenario perbaikan 2 terjadi kenaikan dimulai dari $t = 0$ hingga $t = 720$ jam. Sementara itu dengan skenario perbaikan 2 dihasilkan nilai MTTF sebesar 1968.75 jam atau 82 hari. Availabilitas sistem dengan skenario 2 meningkat jika dibandingkan dengan skenario 1 yaitu sebesar 94.25% dengan *stream days* selama 282 hari.

Tabel 5.8 Perbandingan Sistem Eksisting dengan Skenario 2 pada $t = 720$

Sistem Eksisting (t=720)				
Reliability System	***Hazard Rate***	**MTTF *System***	***Availability System***	***Stream Days***
0.12	7.00E-04	693.62	0.8525	255
Skenario Perbaikan 2 (t=720)				
Reliability System	***Hazard Rate***	**MTTF *System***	***Availability System***	***Stream Days***
0.4037	0.00615	1968.75	94.25%	282

Berdasarkan Tabel 5.8 jika dibandingkan dengan sistem eksisting, diketahui bahwa terjadi penurunan laju kerusakan serta kenaikan pada *reliability system*, MTTF sistem, *availability system*, dan kenaikan pada *stream days*. Hal ini disebabkan oleh pengaruh *redundancy* pada peralatan-peralatan kritis pada subsistem kritis. Subsistem kritis ini memiliki pengaruh besar pada keandalan sistem, sehingga jika peningkatan keandalan dilakukan pada subsistem kritis maka keandalan sistem akan meningkat. Selain mampu meningkatkan keandalan sistem, *redundancy* pada peralatan kritis juga mampu meningkatkan MTTF sistem, *availability system*, serta *stream days*.

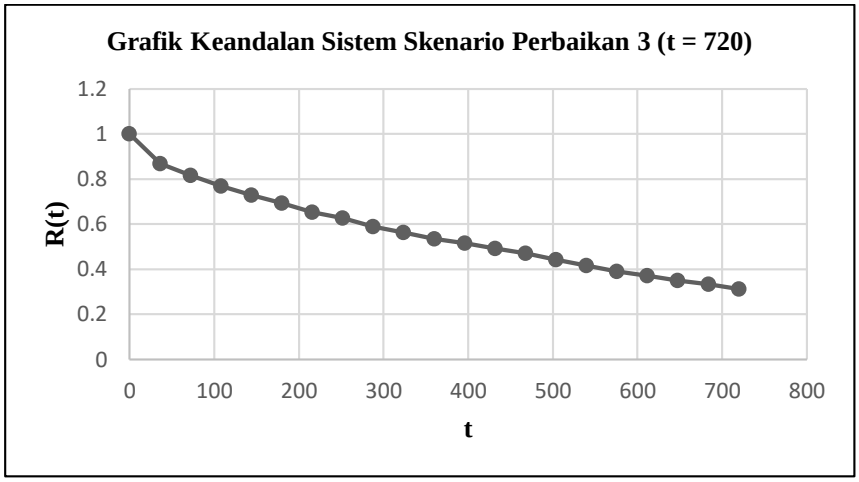
5.4.3 Skenario 3 Perbaikan Sistem

Skenario perbaikan 3 merupakan skenario penggantian peralatan. Pada skenario 3 tidak dilakukan perubahan pada konfigurasi struktur sistem, namun skenario 3 melakukan perubahan parameter pada peralatan-peralatan yang memiliki keandalan rendah (peralatan kritis) pada subsistem kritis yaitu *air compressor* dan *turbine gas*. Sumber dari parameter yang digunakan pada skenario 3 untuk peralatan-peralatan kritis adalah *OREDA Handbook*.

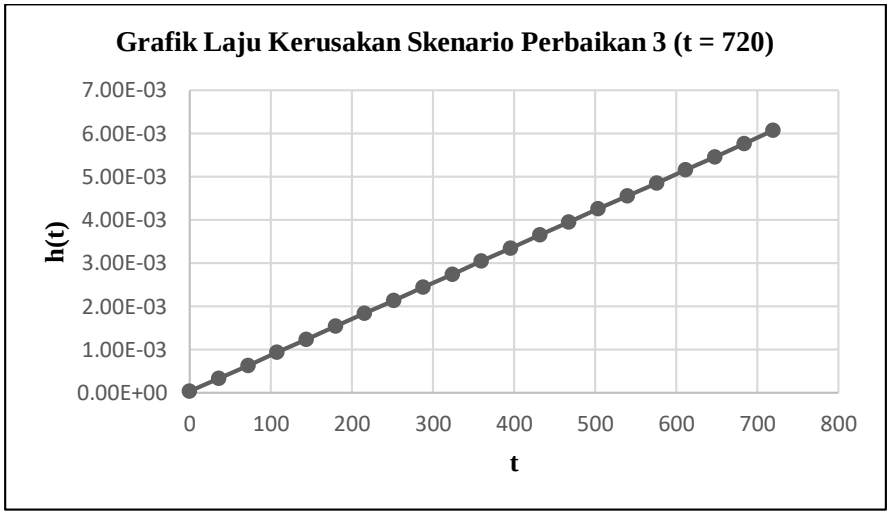
Tabel 5.9 Rekap Hasil Perhitungan Keandalan Sistem dengan Skenario Perbaikan 3 ($t = 720\ jam$)

Skenario Perbaikan 3 ($t = 720$)					
No.	**Nama Subsistem**	**R_Subsys**	**R(sys)**	**h_Subsys**	**h(sys)**
1	Air Compressor	0.69387	**0.31**	6.73394E-05	**0.006**
2	Combustor	0.6924914		6.4505E-06	
3	Turbine Gas	0.71117		1.44425E-05	
4	Power Generator	0.9130603		0.0059844	

Berdasarkan Tabel 5.9 diketahui bahwa nilai keandalan sistem dengan skenario perbaikan 3 pada $t = 720$ jam adalah 0.31 dan nilai laju kerusakan sistem dengan skenario perbaikan 3 pada $t = 720$ jam adalah 0.006. Nilai keandalan sistem dengan skenario perbaikan 3 lebih rendah jika dibandingkan dengan kedua skenario perbaikan lainnya.



Gambar 5.7 Grafik Keandalan Sistem dengan Skenario Perbaikan 3 dengan $t = 720$ jam



Gambar 5.8 Grafik Laju Kerusakan Sistem dengan Skenario Perbaikan 3 pada $t = 720$ jam

Berdasarkan Gambar 5.7 diketahui bahwa dalam kurun waktu 1 bulan $(t = 720\ jam)$ terjadi penurunan keandalan sistem seiring dengan berjalannya waktu. Pada $t = 720$ jam nilai keandalan sistem dengan skenario perbaikan 3 adalah 0.31. Sementara itu berdasarkan Gambar 5.8 nilai laju kerusakan dengan skenario perbaikan 3 pada $t = 720$ jam adalah 0.006. Selain itu dengan menerapkan skenario 3 dihasilkan peningkatan nilai MTTF sebesar 1176.43 jam atau 49 hari, *availability system* sebesar 90.74% dan *stream days* selama 272 hari.

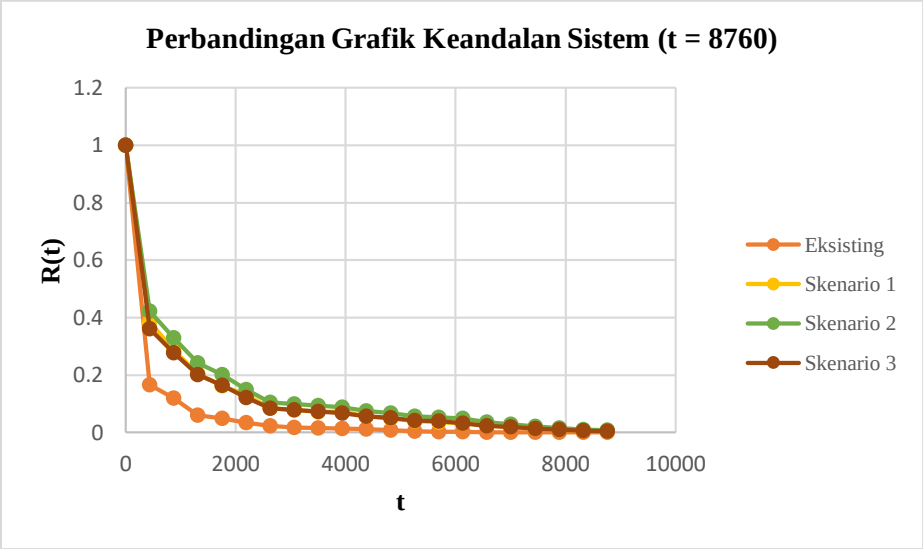
Tabel 5.10 Perbandingan Sistem Eksisting dengan Skenario 3 pada $t = 720$

Sistem Eksisting (t=720)				
Reliability System	***Hazard Rate***	**MTTF System**	***Availability System***	***Stream Days***
0.12	0.0007	693.62	0.8525	255
Skenario Perbaikan 3 (t=720)				
Reliability System	***Hazard Rate***	**MTTF System**	***Availability System***	***Stream Days***
0.3120	0.00607	1176.43	90.74%	272

5.4.4 Analisis Skenario Perbaikan

Perancangan skenario perbaikan untuk meningkatkan keandalan sistem didasarkan pada peralatan-peralatan kritis pada subsistem kritis. Hal ini disebabkan keandalan subsistem kritis memiliki pengaruh besar dalam keandalan sistem. Subsistem kritis tersebut adalah subsistem *air compressor* dan *turbine gas*. Pada subsistem *air compressor*, peralatan-peralatan yang dianggap kritis dan memiliki pengaruh besar pada keandalan subsistem *air compressor* adalah *cooling sealing air*, *comp. pressure indicator*, dan *comp. temperature indicator*. Sementara itu pada subsistem *turbine gas*, peralatan-peralatan kritis adalah *lube oil main pump drain*, *compensator hydraulic oil supply pump*, dan *fuel gas*.

Terdapat 3 usulan skenario perbaikan, yaitu skenario perbaikan 1 adalah perbaikan pada konfigurasi struktur subsistem kritis dengan menerapkan *parallel redundancy*. Sementara itu skenario perbaikan 2 adalah perbaikan konfigurasi struktur pada subsistem kritis dengan menerapkan *standby redundancy* dengan *perfect switch*. Serta skenario perbaikan 3 yang merupakan skenario perbaikan dengan melakukan penggantian peralatan baru pada peralatan-peralatan yang memiliki nilai keandalan rendah pada subsistem kritis.



Gambar 5.9 Perbandingan Grafik Keandalan Sistem Eksisting dengan Ketiga Skenario Perbaikan pada $t = 8760$ jam

Berdasarkan Gambar 5.9 yang merupakan perbandingan grafik keandalan sistem eksisting dengan ketiga skenario perbaikan, dapat terlihat bahwa perbandingan pada nilai $t = 8760$ jam (1 tahun) tidak dapat menunjukkan *behavior system* dengan baik. Oleh karena itu, nilai $t = 720$ jam digunakan pada masing-masing skenario perbaikan untuk mengetahui *behavior system* dan waktu yang tepat untuk dilakukan *maintenance*. Tabel 5.11 merupakan perbandingan antara sistem eksisting dengan ketiga skenario perbaikan pada $t = 8760$ jam.

Tabel 5.11 Perbandingan Antara Sistem Eksisting dengan 3 Skenario Perbaikan pada $t = 8760$ jam

Sistem Eksisting (t=8760)				
Reliability System	***Hazard Rate***	**MTTF System**	***Availability System***	***Stream Days***
1.49767E-05	0.005056306	693.6167126	85.25%	255
Skenario Perbaikan 1 (t=8760)				
Reliability System	***Hazard Rate***	**MTTF System**	***Availability System***	***Stream Days***
0.004410481	0.007102332	1308.56	91.60%	275
Skenario Perbaikan 2 (t=8760)				
Reliability System	***Hazard Rate***	**MTTF System**	***Availability System***	***Stream Days***
0.00700823	0.005074637	1968.75	94.25%	283
Skenario Perbaikan 3 (t=8760)				
Reliability System	***Hazard Rate***	**MTTF System**	***Availability System***	***Stream Days***
0.003325939	0.004992288	1176.43	90.74%	272

Berdasarkan hasil perhitungan keandalan yang telah dilakukan, dengan skenario perbaikan 1 diketahui bahwa nilai keandalan sistem dengan skenario perbaikan 1 pada $t = 720$ jam atau 1 bulan adalah 0.337 dan nilai laju kerusakan sistem pada $t = 720$ jam adalah 0.00818. Sementara itu pada skenario perbaikan 2 dihasilkan nilai keandalan sistem dengan skenario perbaikan 2 pada $t = 720$ jam adalah 0.403 dan nilai laju kerusakan sistem dengan skenario perbaikan 2 pada $t = 720$ jam adalah 0.00615. Nilai keandalan sistem dengan skenario 2 pada $t = 720$ jam mengalami peningkatan jika dibandingkan dengan skenario 1. Hal ini disebabkan oleh pengaruh sistem *standby redundancy* dengan *perfect switch* dimana tidak terdapat pembagian beban kerja (*sharing load*). Ketika peralatan A gagal, maka peralatan B langsung aktif dan *failure rate* peralatan B lebih kecil. Pada skenario perbaikan 3, nilai keandalan sistem yang dihasilkan dengan skenario perbaikan 3 pada $t = 720$ jam adalah 0.312 dan nilai laju kerusakan sistem dengan skenario perbaikan 3 pada $t = 720$ jam adalah 0.00607. Nilai keandalan sistem dengan skenario perbaikan 3 lebih rendah jika dibandingkan dengan kedua skenario perbaikan lainnya. Hal ini disebabkan oleh tidak adanya perubahan konfigurasi struktur pada sistem perbaikan dengan skenario 3.

Berdasarkan hasil perhitungan keandalan sistem yang telah dilakukan dengan 3 skenario perbaikan, skenario perbaikan 2 yang memiliki hasil keandalan sistem lebih baik jika dibandingkan dengan skenario perbaikan lainnya. Hal ini disebabkan adanya perubahan konfigurasi struktur (*redundancy*) pada peralatan-peralatan kritis pada subsistem kritis yaitu *air compressor* dan *turbine gas*. Skenario 2 menerapkan sistem *standby redundancy* dengan *perfect switch* pada peralatan-peralatan kritis. Dimana *standby* dengan *perfect switch* artinya adalah tidak adanya *failure* pada *switch* tersebut sehingga probabilitas *failure* hanya tergantung pada *failure* peralatan tersebut. Pada umumnya, untuk meningkatkan keandalan sistem maka perlu disediakan *redundancy* pada peralatan-peralatan penyusun sistem. Hal ini berfungsi agar tidak mengganggu kelangsungan proses pembangkit listrik tenaga gas yang berjalan selama 24 jam. Proses pembangkit listrik termasuk dalam kategori proses kontinyu, sehingga perusahaan akan mengalami kerugian besar jika prosesnya berhenti tanpa direncanakan atau sering mengalami *downtime*.

Selain itu, jika dibandingkan dengan sistem eksisting, penerapan skenario 2 mampu menghasilkan peningkatan nilai MTTF sebesar 1968.75 jam atau 80 hari serta meningkatnya *availability system* menjadi 94.25% dan meningkatnya *stream days* perusahaan menjadi 282 hari. Kinerja suatu sistem bergantung pada *reliability* dan *availability* dari masing-masing subsistem penyusunnya. *Reliability* dan *availability* merupakan hal penting dalam kelangsungan suatu sistem. Indikator sistem dapat dikatakan handal adalah dengan meningkatnya nilai keandalan sistem, meningkatnya waktu operasi (*stream days*), meningkatnya MTTF sistem, meningkatnya *availability system*, meningkatnya utilitas peralatan-peralatan penyusun sistem, serta menurunnya laju kerusakan. Menurut hasil diskusi dengan pihak PT Pupuk Indonesia Energi, skenario perbaikan 2 dapat diimplementasikan sebagai usulan perbaikan untuk meningkatkan keandalan sistem pembangkit listrik tenaga gas. Namun untuk proses implementasi skenario 2, perusahaan masih membutuhkan kajian kelayakan finansial lebih lanjut agar keputusan yang diambil lebih tepat.

BAB 6
KESIMPULAN DAN SARAN

Pada bab ini akan dijelaskan mengenai kesimpulan yang disimpulkan dari penelitian yang telah dibuat dan saran untuk penelitian selanjutnya.

6.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan maka kesimpulan yang diperoleh sebagai berikut.

1. Sistem pembangkit listrik tenaga gas terdiri atas 4 subsistem utama, yaitu *air compressor*, *combustor*, *turbine gas*, dan *power generator*. Berdasarkan prosesnya, 4 subsistem utama tersebut terhubung secara seri sehingga jika terdapat satu subsistem mengalami kegagalan akan mengakibatkan kegagalan sistem.
2. Subsistem eksisting yang memiliki pengaruh besar dalam keandalan sistem (subsistem kritis) adalah *air compressor* dan *turbine gas* dengan nilai *importance index* sebesar 0.00065 dan 0.00043.
3. Perhitungan keandalan sistem dengan pendekatan distribusi PH menghasilkan nilai keandalan sistem eksisting pada $t = 8760$ jam sebesar 1.49E-05, laju kerusakan sistem sebesar 0.00505, MTTF sistem kondisi eksisting sebesar 693.61 jam (29 hari) dan CVTTF sistem sebesar 0.824, serta *availability system* sebesar 85.25% dan *stream days* selama 255 hari.
4. Analisis sensitivitas dilakukan pada subsistem kritis dengan melakukan perubahan konfigurasi struktur sistem (*redundancy*) dan penggantian peralatan. Hasil analisis dari ketiga skenario perbaikan yang dirancang menunjukkan skenario 2 yang dipilih sebagai usulan perbaikan untuk peningkatan keandalan sistem. Nilai keandalan sistem dengan skenario 2 pada $t = 720$ jam adalah 0.403, *hazard rate* sebesar 0.0006155, MTTF selama 1968 jam atau 82 hari, *availability system* sebesar 94.25% dan *stream days* selama 282 hari.

6.2 Saran

Saran yang diberikan untuk penelitian selanjutnya sebagai berikut.

1. Implementasi skenario perbaikan memerlukan kajian kelayakan finansial sehingga keputusan yang diambil akan lebih tepat.
2. Melakukan pengembangan algoritma operasi perhitungan matriks dalam matriks terutama untuk dimensi matriks yang besar sehingga waktu komputasi dalam metode *matrix-analytic* dapat berkurang.

DAFTAR PUSTAKA

Alkaff, A. & Qomarudin, M. N., 2020. Modeling and Analysis of System Reliability Using Phase-Type Distribution Closure Properties. pp. 1-22.

Assaf & Levikson, 1982. Closure of Phase-Type Distributions Under Operations Arising in Reliability Theory. *Ann Probab,* pp. 265-269.

Buchholz, P., Kriege, J. & Felko, I., 2014. *Input Modeling with Phase-Type Distributions and Markov Models.* London: Springer Briefs in Mathematics.

Daellenbach, H., McNickle, D. & Dye, S., 2012. *Management Science: Decision Making Through System Thinking.* New York: PALGRAVE MACMILLAN.

Dhillon, B., 2006. *Maintainability: Maintenance and Reliability for Engineers.* New York: Taylor & Francis Group.

Elsayed, E., 2012. *Reliability Engineering.* 2nd ed. New Jersey, Canada: John Wiley & Sons, Inc.

Harrel, D. G. D. &. B. D., 2000. *Simulation Using ProModel.* 2nd ed. New York: McGraw-Hill.

Lewis, E., 1994. *Introduction to Reliability Engineering.* 2nd ed. Illinois: John Wiley & Sons, Inc.

Neuts, M. F., 1994. *Matrix-Geometric Solutions in Stochastic Models - An Algorithmic Approach.* New York, USA: Dover Publications, Inc.

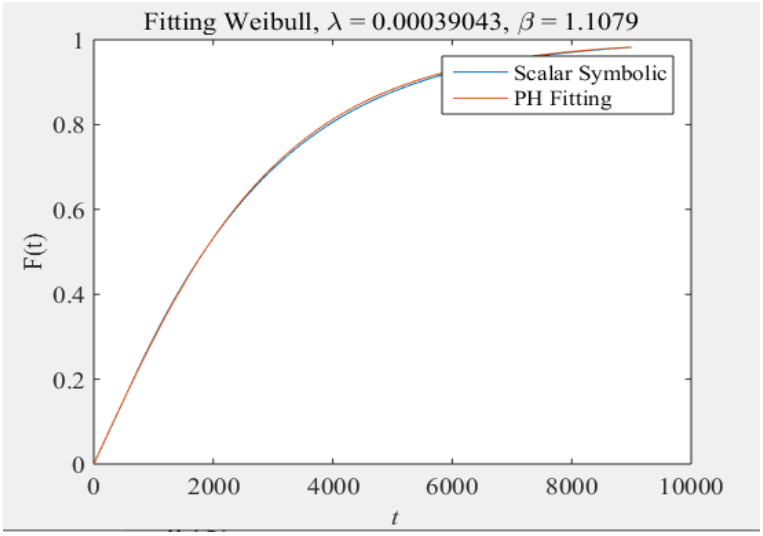
Pansoo, K. H. &. K., 2017. Reliability Models for a Nonrepairable System with Heterogeneous Components Having A Phase-Type Time to Failure Distribution. pp. 37-46.

Trivedi, K. S. & Bobbio, A., 2017. *Reliability and Availability Engineering: Modeling, Analysis, and Applications.* United Kingdom: Cambridge University Press.

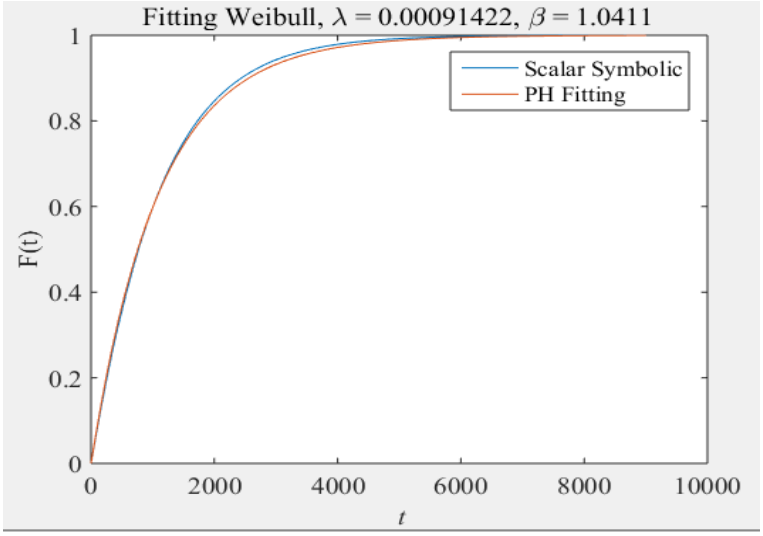
DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN A

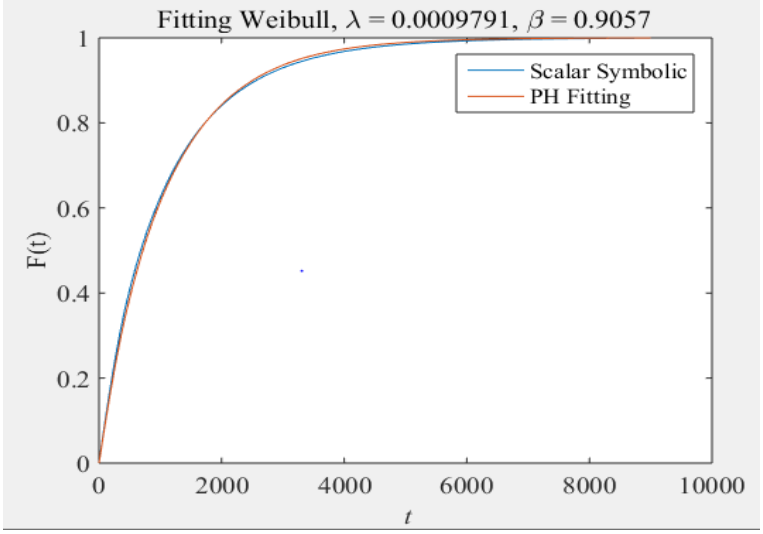
Lampiran A merupakan grafik dari masing-masing sub-subsistem yang merupakan hasil *fitting* distribusi data kerusakan mesin ke dalam distribusi PH.



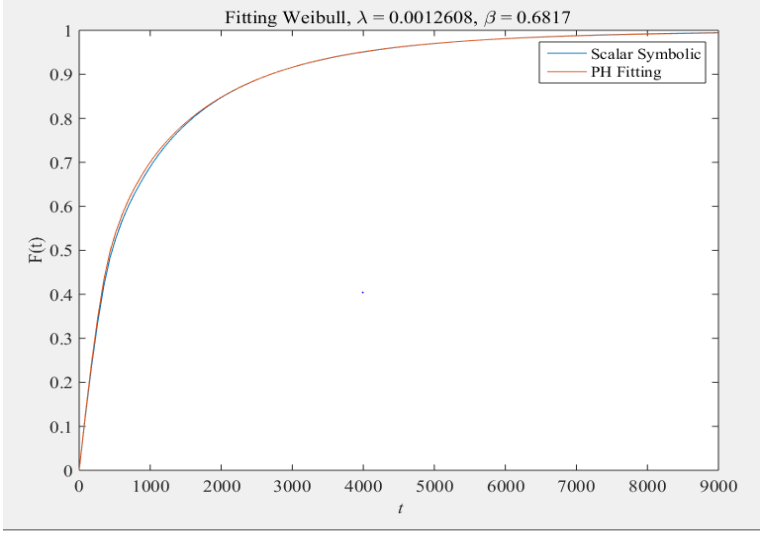
Gambar 1 Grafik CDF Hasil *Fitting* Distribusi *Weibull* Peralatan 01-LBK-001 ke Distribusi PH



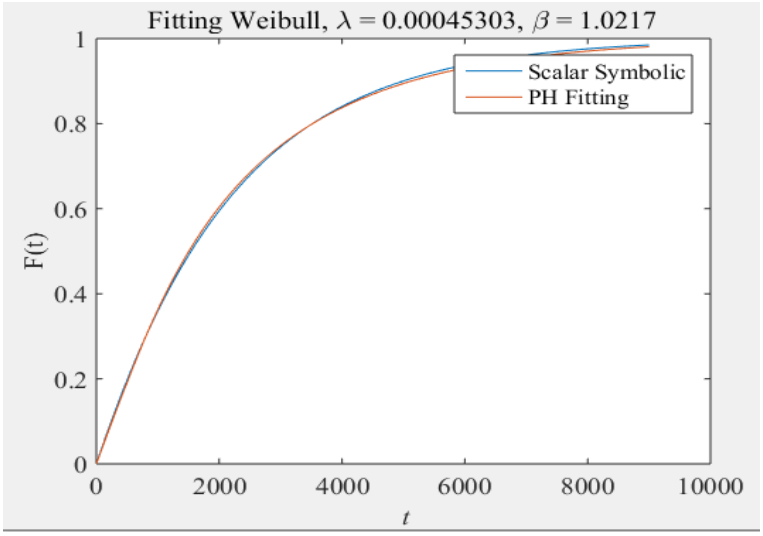
Gambar 2 Grafik CDF Hasil *Fitting* Distribusi *Weibull* Peralatan 01-LDG-001 ke Distribusi PH



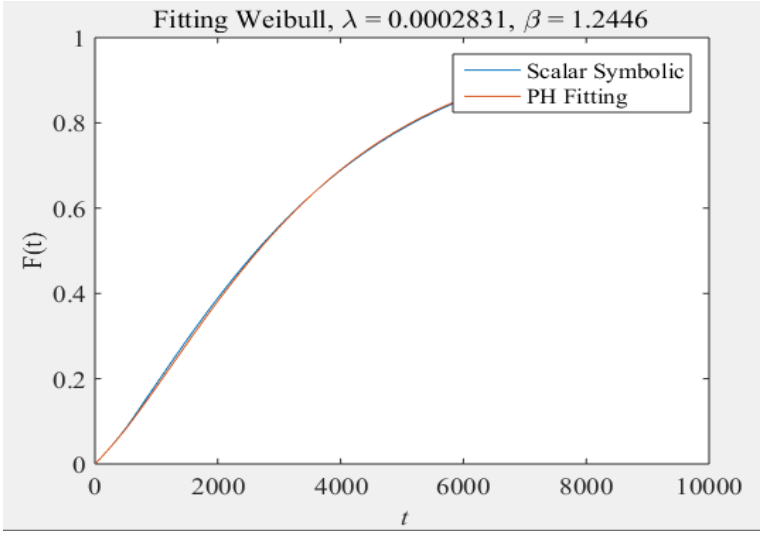
Gambar 3 Grafik CDF Hasil *Fitting* Distribusi *Weibull* Peralatan 01-LE-001 ke Distribusi PH



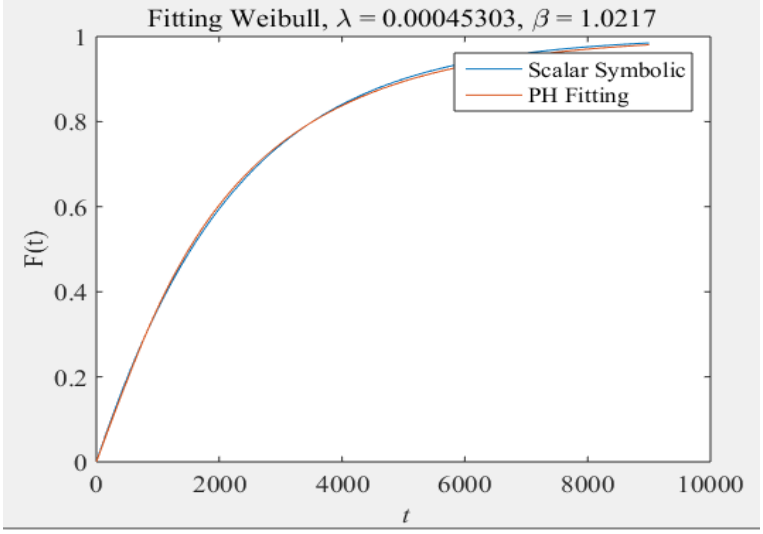
Gambar 4 Grafik CDF Hasil *Fitting* Distribusi *Weibull* Peralatan 01-KA-001 ke Distribusi PH



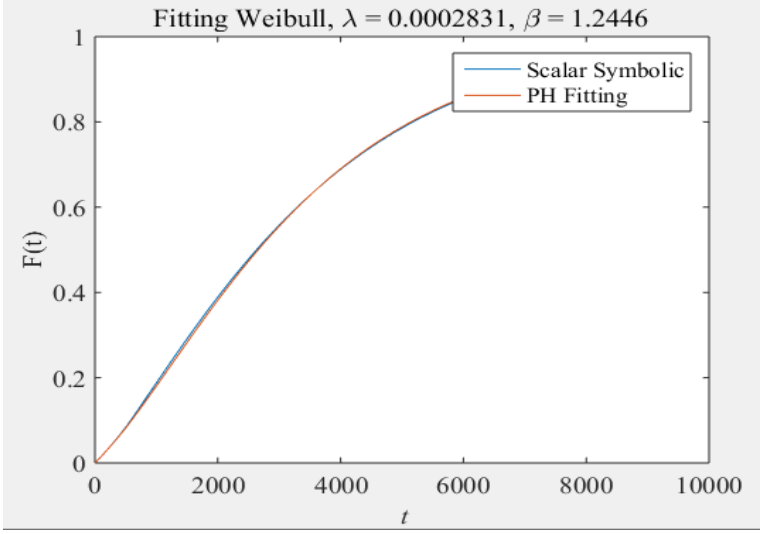
Gambar 5 Grafik CDF Hasil *Fitting* Distribusi *Weibull* Peralatan 01-PCV-003 ke Distribusi PH



Gambar 6 Grafik CDF Hasil *Fitting* Distribusi *Weibull* Peralatan 01-FCV-002 ke Distribusi PH



Gambar 7 Grafik CDF Hasil *Fitting* Distribusi *Weibull* Peralatan 01-TE-053 ke Distribusi PH



Gambar 8 Grafik CDF Hasil *Fitting* Distribusi *Weibull* Peralatan 01-TYT-001 ke Distribusi PH

LAMPIRAN B

Tabel 1 Hasil Perhitungan Fungsi Keandalan Sistem pada Subsistem *Air Compressor*

$t\ (jam)$	$R(t)$	$h(t)$
0	1	2.0495E-09
438	0.47068	8.52E-08
876	0.4359	0.00000053
1314	0.3695	0.00000043
1752	0.36044	0.00000177
2190	0.33563	0.00000372
2628	0.327559	0.0000121
3066	0.3156748	0.0000154
3504	0.3000181	0.0000189
3942	0.2900574	0.0000224
4380	0.2800181	0.0000259
4818	0.2100056	0.0000294
5256	0.1500017	0.0000329
5694	0.1300005	0.0000363
6132	0.1000001	0.0000393
6570	0.053447	0.0000424
7008	0.056617	0.0000461
7446	0.046617	0.0000496
7884	0.046082	0.0000522
8322	0.045009	0.0000578
8760	0.0228506	0.0000735

Tabel 2 Hasil Perhitungan Fungsi Keandalan Sistem pada Subsistem *Combustor*

$t\ (jam)$	$R(t)$	$h(t)$
0	1	2.0495E-07
438	0.69735	0.00000852
876	0.63277	1.68351E-05
1314	0.62354	2.51501E-05
1752	0.54757	4.34652E-05
2190	0.50133	4.17802E-05
2628	0.481033	4.00953E-05
3066	0.470808	5.84103E-05
3504	0.460639	6.67254E-05
3942	0.450512	7.50404E-05
4380	0.420415	8.33555E-05
4818	0.400339	9.16705E-05
5256	0.390280	9.99856E-05
5694	0.380234	0.000108301
6132	0.370196	0.000116616
6570	0.320166	0.000124931
7008	0.280141	0.000133246
7446	0.2301207	0.000141561
7884	0.1867639	0.000149876
8322	0.1417411	0.000158191
8760	0.10766756	0.000166506

Tabel 3 Hasil Perhitungan Fungsi Keandalan Sistem pada Subsistem *Turbine Gas*

$t\ (jam)$	$R(t)$	$h(t)$
0	1	0.0000473
438	0.65336	0.0000485
876	0.6409	0.0000487
1314	0.502507	0.000049
1752	0.495207	0.0000549
2190	0.480916	0.0000507
2628	0.470550	0.0000515
3066	0.380329	0.0000529
3504	0.360197	0.0000573
3942	0.350117	0.0000613
4380	0.3400697	0.0000623
4818	0.3000413	0.000063
5256	0.2700244	0.0000643
5694	0.2200144	0.0000653
6132	0.2100085	0.0000663
6570	0.180005	0.0000673
7008	0.1700029	0.0000683
7446	0.1600017	0.0000693
7884	0.1500010	0.0000703
8322	0.1200005	0.0000713
8760	0.03476179	0.0000723

Tabel 4 Hasil Perhitungan Fungsi Keandalan Sistem pada Subsistem *Power Generator*

$t\ (jam)$	$R(t)$	$h(t)$
0	1	0.000324
438	0.774	0.000545
876	0.67399	0.000766
1314	0.51683	0.000987
1752	0.49951	0.001208
2190	0.421395	0.001429
2628	0.315226	0.00165
3066	0.310803	0.001871
3504	0.3076438	0.002092
3942	0.3053945	0.002313
4380	0.29037974	0.002534
4818	0.29026668	0.002755
5256	0.25018685	0.002976
5694	0.25013065	0.003197
6132	0.24009118	0.003418
6570	0.23006353	0.003639
7008	0.2200442	0.00386
7446	0.20003071	0.004081
7884	0.19001333	0.004302
8322	0.18499692	0.004523
8760	0.17511805	0.004744

Tabel 5 Hasil Perhitungan Fungsi Keandalan Sistem Eksisting

$t\ (jam)$	$R(t)$	$h(t)$
0	1	0.000372
438	0.1659854626	0.0006021
876	0.1191451791	0.0008321
1314	0.0598375276	0.0010616
1752	0.0488206536	0.0013082
2190	0.0340996972	0.0015252
2628	0.0233718437	0.0017537
3066	0.0175682892	0.0019977
3504	0.0153143055	0.0022349
3942	0.0139722357	0.0024717
4380	0.0116251585	0.0027056
4818	0.0073221431	0.0029391
5256	0.0039549525	0.0031732
5694	0.0027202849	0.0034069
6132	0.0018665787	0.0036402
6570	0.0007086490	0.0038736
7008	0.0005933219	0.0041076
7446	0.0003433376	0.0043415
7884	0.0002453028	0.0045744
8322	0.0001416286	0.0048103
8760	0.0000149767	0.0050563

Tabel 6 Hasil Perhitungan Fungsi Keandalan Sistem dengan Skenario Perbaikan 1

$t\ (jam)$	$R(t)$	$h(t)$
0	1	3.29E-05
36	0.917259	0.000431
72	0.860954	0.000741
108	0.819676	0.00105
144	0.779647	0.001749
180	0.735502	0.00205
216	0.702285	0.002444
252	0.671175	0.002854
288	0.634629	0.003264
324	0.600284	0.003673
360	0.580883	0.004083
396	0.549408	0.004493
432	0.525593	0.004903
468	0.496695	0.005313
504	0.469153	0.005723
540	0.453989	0.006133
576	0.416436	0.006543
612	0.396871	0.006953
648	0.372876	0.007363
684	0.35478	0.007773
720	0.337295	0.008183

Tabel 7 Hasil Perhitungan Fungsi Keandalan Sistem dengan Skenario Perbaikan 2

$t\ (jam)$	$R(t)$	$h(t)$
0	1	3.24E-05
36	0.952671	0.000331
72	0.901241	0.000628
108	0.85483	0.000926
144	0.813858	0.001224
180	0.776844	0.001522
216	0.742813	0.00182
252	0.711053	0.002118
288	0.672914	0.002416
324	0.644628	0.002714
360	0.617614	0.003012
396	0.591707	0.003311
432	0.573345	0.003609
468	0.549176	0.003906
504	0.525876	0.004204
540	0.497424	0.004501
576	0.474646	0.004918
612	0.459966	0.005223
648	0.444332	0.005543
684	0.423741	0.005849
720	0.403768	0.006155

Tabel 8 Hasil Perhitungan Fungsi Keandalan Sistem dengan Skenario Perbaikan 3

$t\ (jam)$	$R(t)$	$h(t)$
0	1	3.25E-05
36	0.867176	0.000334
72	0.815026	0.000635
108	0.769348	0.000936
144	0.729818	0.001238
180	0.694254	0.001539
216	0.651886	0.00184
252	0.626002	0.002142
288	0.588791	0.002443
324	0.561968	0.002744
360	0.535004	0.003045
396	0.516006	0.003347
432	0.491846	0.003648
468	0.469854	0.003949
504	0.443565	0.004251
540	0.416847	0.004553
576	0.391331	0.004854
612	0.372473	0.005156
648	0.35125	0.005457
684	0.334541	0.005758
720	0.312008	0.006073

(*Halaman ini sengaja dikosongkan*)

BIOGRAFI PENULIS

Penulis bernama lengkap Sekar Puspita Dewi dan lahir di Kendal, 24 Agustus 1998. Penulis merupakan anak pertama dari dua bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal di TK Islam Al Falahiyyah Jakarta, SDN Tengah 01 Pagi Jakarta, SMPN 20 Jakarta, dan SMAN 62 Jakarta.

Pada tahun 2016 penulis diterima menjadi salah satu mahasiswa di Departemen Teknik dan Sistem Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Selama masa perkuliahan penulis aktif dalam beberapa pelatihan, diantaranya adalah Latihan Penulisan Karya Tulis Ilmiah (PKTI-TD), Latihan Keterampilan Manajemen Mahasiswa (LKMM Pra-TD), Latihan Keterampilan Manajemen Wirausaha (LKMW-TD), Latihan Keterampilan Manajemen Mahasiswa (LKMM-TD), Pelatihan Pengembangan Kepribadian Program Studi Islam 1, AutoCAD *Training*, *Quality Improvement Engineering Training*, dan ARENA *Training*. Selain itu selama masa perkuliahan penulis juga berpartisipasi pada kegiatan organisasi mahasiswa diantaranya sebagai Staff Departemen Syiar Masyarakat Studi Islam Ulul Ilmi (MSI-UI) Teknik Industri ITS 2017/2018, *Steering Committee* Laskar IEnspirasi yang diadakan oleh Departemen Sosial Masyarakat Himpunan Mahasiswa Teknik Industri ITS 2018/2019, *Secretary and Administration Committee Industrial Engineering Games* 13^{th} yang diadakan oleh Departemen *Industrial Engineering Fair* (IE Fair) Himpunan Mahasiswa Teknik Industri ITS 2018/2019. Dalam rangka pengaplikasian keilmuan Teknik dan Sistem Industri, pada bulan Juli 2019 penulis melakukan kerja praktik di Departemen Perencanaan dan Pengendalian Produksi PT Pupuk Sriwidjaja Palembang. Mata kuliah pilihan yang diambil oleh penulis selama perkuliahan adalah *Six Sigma*, *Ergo Safety*, Manajemen Pengetahuan, Manajemen Persediaan dan Pengadaan, serta Manajemen Keuangan. Untuk informasi lebih lanjut, penulis dapat dihubungi melalui *email* di sekarpd98@gmail.com.