

**PERANCANGAN MODEL RELIABILITAS PADA
REPAIRABLE SYSTEM UNTUK MENENTUKAN WAKTU
OPTIMUM OVERHAUL ENGINE DUMP TRUCK
(STUDI KASUS: *RELIABILITY ANALYSIS* PADA
DUMP TRUCK TAMBANG BATUBARA PAMA)**

SKRIPSI

**NOVIANTI DIAN PRATIWININGTYAS
0404070476**



**UNIVERSITAS INDONESIA
FAKULTAS TEKNIK
DEPARTEMEN TEKNIK INDUSTRI
DEPOK
JULI 2008**

**PERANCANGAN MODEL RELIABILITAS PADA
REPAIRABLE SYSTEM UNTUK MENENTUKAN WAKTU
OPTIMUM OVERHAUL ENGINE DUMP TRUCK
(STUDI KASUS: *RELIABILITY ANALYSIS* PADA
DUMP TRUCK TAMBANG BATUBARA PAMA)**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana teknik

**Novianti Dian Pratiwiningtyas
0404070476**



**UNIVERSITAS INDONESIA
FAKULTAS TEKNIK
DEPARTEMEN TEKNIK INDUSTRI
DEPOK
JULI 2008**

PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi saya dengan judul :

**PERANCANGAN MODEL RELIABILITAS PADA *REPAIRABLE SYSTEM*
UNTUK MENENTUKAN WAKTU *OPTIMUM OVERHAUL*
ENGINE DUMPTRUCK
(STUDI KASUS: *RELIABILITY ANALYSIS* PADA *DUMPTRUCK*
TAMBANG BATUBARA PAMA)**

yang dibuat untuk melengkapi sebagian persyaratan menjadi Sarjana Teknik pada Departemen Teknik Industri, Fakultas Teknik Universitas Indonesia, sejauh yang saya ketahui bukan merupakan tiruan atau duplikasi dari skripsi yang sudah dipublikasikan atau pernah dipakai untuk mendapatkan gelar kesarjanaan di lingkungan Universitas Indonesia maupun di Perguruan Tinggi atau instansi manapun, kecuali di bagian yang sumber informasinya dicantumkan sebagaimana mestinya.

Depok, Juli 2008

Novianti Dian Pratiwiningtyas
0404070476

LEMBAR PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Novianti Dian Pratiwiningtyas
NPM : 0404070476
Program Studi : Teknik Industri
Judul Skripsi : Perancangan Model Reliabilitas pada *Repairable System* untuk Menentukan Waktu *Optimum Overhaul Engine Dumptruck*
(Studi Kasus: *Reliability Analysis pada Dumptruck Tambang Batubara PAMA*)

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana pada Program Program Teknik Industri Fakultas Teknik Universitas Indonesia

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Ir. Yadrifil, M.Sc. ()
Penguji : Ir. M. Dachyar, M.Sc. ()
Penguji : Armand Omar Moeis ST., M.Sc. ()

Ditetapkan di : Depok
Tanggal : 10 Juli 2008

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji dan syukur penulis panjatkan kehadiran Tuhan Yang Maha Esa karena dengan limpahan berkat dan kasih-Nya penyusunan skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik dan tepat pada waktunya.

Pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah membantu dan mendukung dalam penyusunan skripsi ini. Adapun pihak-pihak itu antara lain:

1. Kedua orang tua penulis serta kedua adik Dimas dan Desi atas dukungan, doa, motivasi, dan selalu setia menemani penulis dalam keadaan apapun.
2. Bapak Ir. Yadrifil, MSc selaku dosen pembimbing skripsi yang telah memberikan bimbingan, arahan, dan motivasi yang berharga kepada penulis dalam penyelesaian skripsi ini.
3. Bapak Dr. Ir. T. Yuri M. Zagloel, M.Eng.Sc. selaku ketua Departemen Teknik Industri Fakultas Teknik Universitas Indonesia yang telah memberikan masukan dan informasi kenalan dosen ITB.
4. Bapak Prof. Dr. Ir. Bermawi P. Iskandar selaku Dosen Teknik Industri ITB atas waktu, bimbingan, motivasi, dan sumber referensi buku.
5. Seluruh Dosen Departemen Teknik Industri Universitas Indonesia.
6. Bapak Dr. Ir. Harinaldi M.Eng dan Bapak Warjito selaku Dosen Departemen Teknik Mesin Universitas Indonesia atas masukkannya.
7. Seluruh staf administrasi dan rumah tangga Departemen Teknik Industri Universitas Indonesia atas pelayanan yang telah diberikan selama ini.
8. Bapak Darwin selaku Kepala Divisi *Operation Research* PAMA yang telah memberikan kesempatan, bimbingan, dan masukan.
9. Bapak Gamma selaku pembimbing di PAMA sekaligus teman yang telah banyak membantu dalam pengumpulan data, masukan, serta kepercayaannya bagi penulis dalam menangani proyek ini.
10. Bapak Chris, Bapak Andri, Bapak Dwi, Bapak Acil, Bapak Edi, Bapak Ruli, seluruh staf *Engineering* khususnya dan seluruh karyawan PAMA atas segala bentuk bantuan dan perhatiannya.
11. Dafid, Dipi, dan Ucok atas kebersamaan di PAMA.

12. Ian, Bejo, Fahmi, Unggul, dan Arli sebagai teman satu bimbingan skripsi.
13. Lina, Amy, Ape, Ajeng, Munjida, Erika dan seluruh rekan-rekan di Teknik UI yang selalu setia memberikan dukungannya kepada penulis.
14. Willem atas bantuannya membukakan email, dukungan, kebersamaan dan kesetiiaanya menemani penulis di Kuktek.
15. Wulan dan Kresna atas pinjaman flashdisknya dan dukungannya. Wulan atas kesetiiaanya menemani penulis jalan-jalan dan berbagi cerita. Andrew buat pinjaman kartu perpusnya.
16. Beatricia, Ridang, Willy, Reza, Jeffry, Rini, Novi, Venita, Niky, Yunita dan semua Kuktekers atas dukungan, bantuan, serta kebersamaanya.
17. Rekan-rekan sahabat di luar teknik, Icha, Ernest, Via, Mba Novi, Meirisa, Ifa, dan teman-teman di ITB, serta kawan-kawan yang telah memberi bantuan baik semangat selama penyusunan skripsi ini.
18. Keluarga besar Harjowiyono dan Sudarman atas segala doa dan dukungannya.
19. Seluruh pihak, yang telah membantu penulis dari awal sampai selesainya penyusunan skripsi ini, yang tidak memungkinkan untuk disebutkan satu persatu.

Tak ada gading yang tak retak, begitupun dalam penulisan skripsi ini. Maka dari itu penulis mengharapkan saran dan masukan yang bersifat membangun. Semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi PAMA pada khususnya dan seluruh rekan yang ingin membaca pada umumnya.

Depok, 24 Juni 2008

Penulis

**LEMBAR PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
KARYA ILMIAH UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Novianti Dian Pratiwiningtyas
NPM/NIP : 0404070476
Program Studi : Teknik Industri
Fakultas : Teknik
Jenis karya : Skripsi

demikian pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Non- Eksklusif (*Non-exclusiveRoyalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul : Analisis Pengaruh *Perceived Justice* terhadap Keluhan Pelanggan pada *Hypermarket* di Jakarta

beserta perangkat yang ada (bila diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Non-Eksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelolanya dalam bentuk pangkalan data (*database*), mendistribusikannya, dan menampilkan/mempublikasikannya di Internet atau media lain untuk kepentingan akademis tanpa perlu meminta ijin dari saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta. Segala bentuk tuntutan hukum yang timbul atas pelanggaran Hak Cipta dalam karya ilmiah ini menjadi tanggungjawab saya pribadi.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok
Pada tanggal : 24 Juni 2008
Yang menyatakan

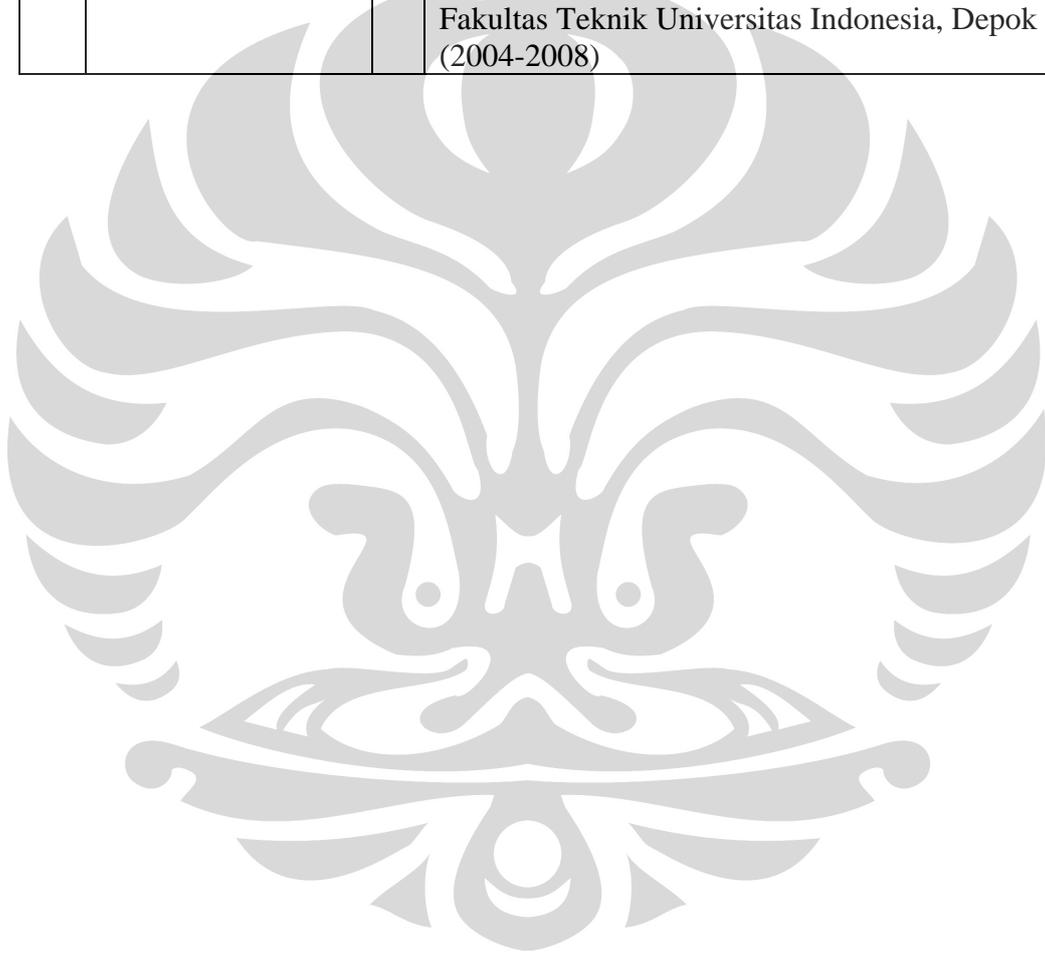
(Novianti Dian Pratiwiningtyas)

RIWAYAT HIDUP PENULIS

Nama : Novianti Dian Pratiwiningtyas
Tempat, Tanggal Lahir : Jakarta, 29 Maret 1986
Alamat : Jl. Haji Baping Gg.Usaha Rt 011/09 No 26, Ciracas
Jakarta Timur 13740

Pendidikan :

a.	SD	:	SDN Ciracas 14 Pagi, Jakarta (1992-1998)
b.	SLTP	:	SLTPN 103 Cijantung, Jakarta (1998-2001)
c.	SMU	:	SMUN 8, Jakarta (2001-2004)
d.	S-1	:	Departemen Teknik Industri Fakultas Teknik Universitas Indonesia, Depok (2004-2008)



ABSTRAK

Nama : Novianti Dian Pratiwiningtyas
Program studi : Teknik Industri
Judul : Perancangan Model Reliabilitas pada *Repairable System* untuk Menentukan Waktu *Optimum Overhaul Engine Dump Truck*: Studi Kasus *Reliability Analysis* pada *Dump Truck* Tambang Batubara PAMA

Sistem *repairable* pada pengoperasian *engine* umumnya merupakan sistem kompleks dengan interval antara kegagalan tidak mengikuti distribusi yang sama. Kondisi *engine* sebagai sistem *repairable* mengalami keausan sejalan dengan waktu yang berdampak pada penurunan *performance* dan peningkatan *cost*. Hal ini merupakan permasalahan kritis khususnya dalam penentuan waktu *overhaul engine* di PAMA dalam pengoperasian armada *dumptruck*. Mengingat penentuan waktu *overhaul engine* sulit karena saat ini belum tersedia panduan dari perusahaan untuk menentukan kapan suatu *engine* harus di-*overhaul* secara ekonomis, maka perlu dirancang suatu model yang dapat menentukan waktu *optimum overhaul* dari *engine dumptruck*.

Dalam rancangan ini model NHPP digunakan sebagai metode pendugaan awal *intensitas failure* yang menggambarkan penurunan *performance engine*. Jika model ini tidak memenuhi kesesuaian, maka digunakan model GRP. Hasil model terpilih dipadukan dengan biaya *maintenance* dan *overhaul* digunakan untuk menentukan waktu *optimum overhaul engine*.

Dari analisis terhadap hasil model, dapat disimpulkan bahwa: 1) model GRP adalah model terbaik untuk *repairable system* dibanding model NHPP berdasarkan nilai LKV yang paling positif; 2) hasil nilai β rata-rata > 1 yaitu 1.6510253, maka secara umum sistem sedang mengalami fase penurunan; 3) rata-rata nilai T_0 adalah 31,277 *hourmeter*, sedangkan 7 *dumptruck* lainnya nilai T_0 belum dapat dihitung karena baru memiliki nilai $\beta < 1$.

Kata kunci :
Sistem *repairable*, *reliability analysis*, *non homogeneous Poisson process*, *general renewal process*, *optimum overhaul*.

ABSTRACT

Name : Novianti Dian Pratiwiningtyas
Study Program: Industrial Engineering
Title : Design of Reliability Models in Repairable System to Determine Optimum Time to Overhaul Engine Dump Truck:
A Case Study on Reliability Analysis of Dump Truck in Coal Mining PAMA

Repairable system in engine operations is a complex system that has interval between failure where the failure does not follow equal distribution. Engine's condition as a repairable system has worn-out by time which the impact is on reducing the performance and increasing the cost. The impact is a critical problem especially in the operating of dump truck fleet. It is difficult to estimate the time of engine overhaul because there is no guidance from the company to determine when the engine needs to be overhauled economically. Therefore, it is highly needed to design a model that is able to determine optimum overhaul time of engine dump truck.

In this design, NHPP model is used as initial estimate failure intensity method that can describe reducing of engine performance. If this model is not appropriate then the GRP model is used. Result of choosing model combined with average maintenance and overhaul cost are used to determine optimum overhaul engine.

The following are the research results: 1) GRP model is the best model for repairable systems than NHPP model based on LKV value that is more positive; 2) results of mean value $\beta > 1$ is 1.6510253 therefore the system is on deterioration phase; 3) mean value of T_o is 31,277 hourmeter meanwhile the value of 7 other dumptrucks can't be determined yet because value $\beta < 1$.

Key words:

Repairable system, reliability analysis, non homogeneous Poisson process, general renewal process, optimum overhaul.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
PERNYATAAN KEASLIAAN SKRIPSI.....	ii
LEMBAR PENGESAHAN.....	iii
UCAPAN TERIMA KASIH.....	iv
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH	vi
RIWAYAT HIDUP PENULIS	vii
ABSTRAK	viii
ABSTRACT	ix
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR TABEL.....	xiii
DAFTAR GAMBAR.....	xiv
DAFTAR LAMPIRAN.....	xv
1. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang Masalah.....	1
1.2. Diagram Keterkaitan Masalah.....	3
1.3. Rumusan Permasalahan.....	3
1.4. Tujuan Penelitian.....	4
1.5. Batasan Masalah.....	4
1.6. Metodologi Penelitian.....	4
1.7. Sistematika Penulisan.....	7
2. LANDASAN TEORI	9
2.1. Sistem Dan Kegagalan.....	9
2.1.1. <i>Nonrepairable</i> Systems.....	10
2.1.2. <i>Repairable</i> Systems.....	10
2.2. <i>Statistical Distribution</i> dan Tipe Data.....	12
2.2.1. Distribusi Probabilitas.....	12
2.2.1.1. Fungsi Kepadatan Probabilitas Kontinu.....	12
2.2.1.2. Fungsi Distribusi Kumulatif.....	13
2.2.2. Fungsi Reliabilitas.....	14
2.2.3. Tipe Data.....	16
2.2.3.1. <i>Random variable</i>	16
2.2.3.2. <i>Discrete random variable</i>	16
2.3. Reliabilitas.....	16
2.3.1. Definisi Reliabilitas.....	16
2.3.2. Analisis Sebaran.....	18
2.3.2.1. Distribusi Eksponensial.....	18
2.3.2.2. Distribusi Weibull.....	19
2.3.3. Model <i>Stochastic Point Process</i>	20
2.3.3.1. <i>Renewal Process / Homogeneous Poisson Process</i>	21
2.3.3.2. <i>Nonhomogeneous Poisson Process (NHPP)</i>	21
2.3.3.3. <i>General Renewal Process (Kijima Model 1)</i>	24
2.3.3.4. <i>General Renewal Process (Kijima Model II)</i>	25
2.3.3.5. <i>Power Law Model</i>	28

2.3.3.6. Pengujian Statistik <i>Cramér-von mises</i>	33
2.4. Waktu <i>Optimum Overhaul</i>	34
3. PENGUMPULAN DATA	37
3.1. Profil Perusahaan	37
3.1.1. Sejarah Singkat.....	37
3.1.2. Nilai-Nilai Perusahaan.....	37
3.1.3. Struktur Organisasi.....	39
3.1.4. Proses Bisnis	39
3.2. Pengumpulan Data	41
3.2.1. Perumusan Data.....	41
3.2.2. Metodologi Pengolahan Data <i>WO</i>	42
3.3. Perumusan Model	45
3.3.1. Metodologi Pemodelan.....	46
3.3.1.1. Model Power Law.....	46
3.3.1.2. Model GRP.....	47
3.4. Perhitungan Waktu <i>Optimum Overhaul</i>	48
3.5. Uji Validitas.....	49
3.5.1. Perhitungan Manual.....	49
3.5.2. Perhitungan Hasil <i>Software</i>	50
3.5.2.1. Hasil RGA 6	51
3.5.2.2. Hasil Weibull ++7.....	52
4. PENGOLAHAN DATA DAN ANALISIS	53
4.1. Pengolahan Data Awal	53
4.1.1. Pengolahan Data Biaya Maintenance	54
4.1.2. Analisis Data Awal.....	63
4.2. Model Reliabilitas.....	65
4.2.1. Pengolahan Data Model Power Law	68
4.2.1.1. Analisis Keseluruhan Sistem.....	68
4.2.1.2. Analisis Model Power Law	73
4.2.1.3. Analisis <i>Cramér-von mises</i>	75
4.2.2. Pengolahan Data Model GRP I.....	76
4.2.2.1. Analisis Hasil Model GRP I.....	77
4.2.2.2. Analisis Perbandingan Model GRP I dengan NHPP Power Law.....	79
4.2.3. Pengolahan Data Model GRP II.....	80
4.2.3.1. Analisis Hasil Model GRP II.....	80
4.2.3.2. Analisis Perbandingan Model GRP II dengan NHPP Power Law	81
4.3. Model Pilihan.....	82
4.3.1. Perbandingan LKV	82
4.3.2. Analisis Model Terpilih	84
4.3.3. Analisis Parameter Model Terpilih	84
4.4. Analisis Waktu <i>Optimum Overhaul</i> (To).....	85
4.4.1. Analisis Waktu <i>Optimum Overhaul</i> (To) Terhadap Beta (β).....	87
4.4.2. Analisis Waktu <i>Optimum Overhaul</i> (To) Terhadap <i>Average Cost (C1)</i>	88

4.4.3. Analisis Waktu <i>Optimum Overhaul</i> (T_o) Terhadap Lamda (λ).....	88
4.4.4. Analisis Kesimpulan Waktu <i>Optimum Overhaul</i> (T_o).....	89
5. KESIMPULAN	90
5.1. Kesimpulan.....	90
DAFTAR REFERENSI.....	92



DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Data <i>Hour Meter</i>	43
Tabel 3.2 Data Biaya Material	43
Tabel 3.3 Contoh Hasil Pengolahan Data <i>WO</i>	44
Tabel 3.4 Hasil Perhitungan Manual DT 3083	49
Tabel 4.1 Data Perhitungan Biaya <i>DT</i> 3049	54
Tabel 4.2 Data Perhitungan Biaya <i>DT</i> 3050	55
Tabel 4.3 Data Perhitungan Biaya <i>DT</i> 3051	55
Tabel 4.4 Data Perhitungan Biaya <i>DT</i> 3057	56
Tabel 4.5 Data Perhitungan Biaya <i>DT</i> 3058	56
Tabel 4.6 Data Perhitungan Biaya <i>DT</i> 3073	57
Tabel 4.7 Data Perhitungan Biaya <i>DT</i> 3075	57
Tabel 4.8 Data Perhitungan Biaya <i>DT</i> 3076	58
Tabel 4.9 Data Perhitungan Biaya <i>DT</i> 3083	58
Tabel 4.10 Data Perhitungan Biaya <i>DT</i> 3106	58
Tabel 4.11 Data Perhitungan Biaya <i>DT</i> 3085	59
Tabel 4.12 Data Perhitungan Biaya <i>DT</i> 3084	59
Tabel 4.13 Data Perhitungan Biaya <i>DT</i> 3086	60
Tabel 4.14 Data Perhitungan Biaya <i>DT</i> 3087	60
Tabel 4.15 Data Perhitungan Biaya <i>DT</i> 3099	61
Tabel 4.16 Data Perhitungan Biaya <i>DT</i> 786	61
Tabel 4.17 Data Perhitungan Biaya <i>DT</i> 3101	62
Tabel 4.18 Data Perhitungan Biaya <i>DT</i> 680	62
Tabel 4.19 Data Perhitungan Biaya <i>DT</i> 3102	63
Tabel 4.20 Data Perhitungan Biaya <i>DT</i> 787	63
Tabel 4.21 Data Waktu Kegagalan	67
Tabel 4.22 <i>Analisis Summary</i> Model Power Law	68
Tabel 4.23 Hasil Model Power Law	74
Tabel 4.24 Uji Statistik Model Power Law	76
Tabel 4.25 Hasil Model GRP I	78
Tabel 4.26 Hasil Model GRP II	80
Tabel 4.27 Perbandingan LKV	83
Tabel 4.28 Perbandingan Model NHPP dan Terpilih	84
Tabel 4.29 Parameter Model Terpilih	85
Tabel 4.30 Parameter <i>Optimum Overhaul</i> (To)	86
Tabel 4.31 Rangkuman Parameter	87
Tabel 4.32 Kesimpulan Nilai <i>Optimum Overhaul</i> (To)	89

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Diagram Keterkaitan Masalah.....	3
Gambar 1.2 Diagram Alir Metodologi Penelitian	6
Gambar 1.3 Diagram Alir Metodologi Penelitian (<i>lanjutan</i>).....	7
Gambar 2.1 <i>Interarival</i> Data Kegagalan.....	11
Gambar 2.2 Kurva <i>PDF</i>	13
Gambar 2.3 Kurva <i>CDF</i>	13
Gambar 2.4 <i>Reliability Vs Unreliability</i>	14
Gambar 2.5 Hubungan <i>MTBF, MTTR, MTTF</i>	16
Gambar 2.6 <i>Restoration Factor</i>	20
Gambar 2.7 Struktur Sistem <i>Repairable</i>	25
Gambar 2.8 <i>Bathub Curve</i>	29
Gambar 2.9 Umur dan Waktu kegagalan.....	29
Gambar 2.10 Grafik <i>Cost dan Performance</i>	35
Gambar 2.11 <i>Cumulative Mean Function</i>	35
Gambar 2.12 <i>Cumulative Maintenance Cost dan Overhaul Cost</i>	35
Gambar 2.13 <i>Average System Cost</i>	36
Gambar 3.1 Struktur Organisasi PAMA.....	39
Gambar 3.2 <i>Business Process PAMA</i>	40
Gambar 3.3 <i>Dump Truck</i>	45
Gambar 3.4 Diagram IPO (<i>Input-Process-Output</i>)	46
Gambar 3.5 Hasil RGA 6.....	51
Gambar 3.6 Hasil Weibull ++7	52
Gambar 4.1 Rata-rata Biaya <i>Maintenance</i>	64
Gambar 4.2 Analisis Regresi.....	65
Gambar 4.3 Metodologi Model Mencapai <i>To</i> (Waktu <i>Optimum Overhaul</i>)	66
Gambar 4.4 Jumlah Kegagalan Versus Waktu.....	69
Gambar 4.5 <i>Instantaneous Failure Intensity</i> Versus Waktu	70
Gambar 4.6 <i>Plotting</i> Kegagalan	71
Gambar 4.7 <i>Reliability</i> Versus Waktu	73
Gambar 4.8 Waktu <i>Optimum Overhaul</i> (<i>To</i>) Vs Beta (β)	87
Gambar 4.9 Waktu <i>Optimum Overhaul</i> (<i>To</i>) Vs <i>Average Cost</i> (<i>C1</i>)	88
Gambar 4.10 Waktu <i>Optimum Overhaul</i> (<i>To</i>) Vs Lamda (λ)	88

DAFTAR LAMPIRAN

- Lampiran 1. Model NHPP Power Law
- Lampiran 2. Model GRP I
- Lampiran 3. Model GRP II



1. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang Masalah

Dunia abad 21 memiliki keberagaman yang tinggi dalam banyak hal. Kompleksitas tergambar dalam banyaknya produk dan sistem yang kita gunakan. Ekspektasi pembeli terhadap kemampuan produk atau sistem sesuai fungsinya akan selalu tinggi dan semakin tinggi. Kemampuan produk atau sistem sesuai dengan fungsinya disebut sebagai reliabilitas. Semakin tinggi ekspektasi pembeli sementara peluang kemampuan produk untuk memenuhi ekspektasi semakin rendah sehingga dapat menimbulkan *gap*. Untuk memenuhi *gap* ini maka perlu adanya pengukuran dan peningkatan reliabilitas dari produk atau sistem.

Dalam pemakaian produk atau sistem yang kompleks maka sebagian besar konsumen dapat mentolerir kegagalan namun hanya dalam jumlah yang sangat kecil. Kegagalan dapat diminimalisasi dengan reliabilitas yang sangat tinggi seperti harapan. Bagaimana reliabilitas tinggi dapat tercapai? Banyak faktor yang mempengaruhi nilai reliabilitas seperti design teknik, *materials*, *manufacturing*, *operation*, dan *maintenance*. Tujuan dari reliabilitas dapat dimengerti melalui fenomena kegagalan, estimasi dan prediksi reliabilitas, serta optimasi. Reliabilitas adalah salah satu karakteristik paling penting dalam pendefinisian kualitas suatu produk atau sistem bagi manufaktur dan juga pembeli. Pencapaian reliabilitas yang tinggi meliputi *design* monitoring yang baik, material dan input lainnya, produksi, usaha *quality assurance*, serta *maintenance*.

PAMA merupakan perusahaan yang bergerak dalam bidang kontraktor tambang batubara. Dalam menjalankan aktivitas utama PAMA memiliki dua alat tambang utama yaitu alat muat (*loader*) dan alat angkut (*hauler*). Melihat pentingnya peranan kedua alat ini dalam kegiatan penambangan maka kehandalan alat pada saat dipakai mutlak diperhatikan. Kegagalan pada *engine* sebagai sebuah komponen utama dari suatu sistem alat tambang akan menyebabkan kegagalan keseluruhan sistem. Oleh karena itu perlu adanya pengukuran kehandalan dari *engine*. Pengukuran kehandalan ini dapat dimodelkan melalui analisis reliabilitas sehingga kita dapat mengetahui model penurunan *performance*.

Sistem adalah kumpulan dari subsistem, perakitan, atau komponen yang disusun untuk mencapai fungsi yang khusus. Sistem ada yang dapat diperbaiki atau tidak dapat diperbaiki. Perbedaan inilah yang membuat pendekatan metode analisis yang berbeda dalam penyelesaiannya. Dalam penulisan ini dilakukan analisa dengan model proses *stochastic* karena kompleksitas sistem *repairable* (dapat diperbaiki). Beberapa analisis *warranty* pada sistem *non-repairable* dapat menggunakan metode analisis distribusi yang umumnya adalah analisis *weibull*. Untuk sistem *repairable*, analisis distribusi tidak valid sebagai sistem karena memiliki karakter tidak dapat kembali ke kondisi baru setelah diperbaiki. Umumnya interval antara kegagalan dari sistem yang kompleks tidak mengikuti distribusi yang sama. Ketika mencocokkan sebuah distribusi terdapat asumsi bahwa kejadian secara statistik independen dan identik terdistribusi (*s.i.i.d*). Bagaimanapun dalam sistem *repairable* kegagalan tidak independen dan dalam banyak kasus kegagalan tidak dapat identik terdistribusi.

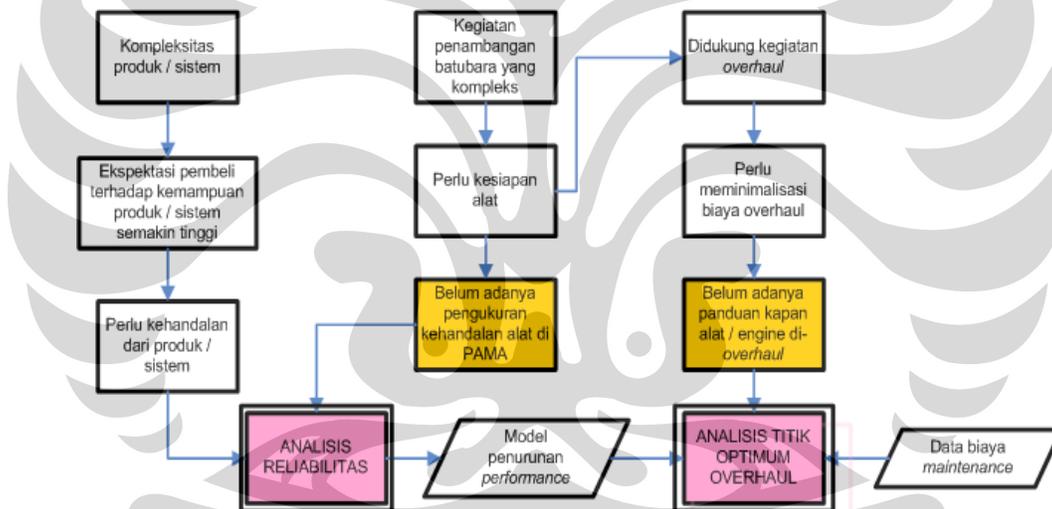
Umumnya kejadian sistem *as bad as old* setelah mengalami perbaikan. Ini terutama terjadi dalam sistem yang kompleks dimana pergantian sebuah komponen tidak dapat berdampak besar dalam sistem reliabilitas. Jika kita memakai metode analisis distribusi (*s.i.i.d*) maka kita tidak dapat menentukan kapan sistem harus di *overhaul*. Analisa distribusi bukan pendekatan untuk analisa sistem *repairable* karena waktu antara kegagalan tidak mengikuti pola *s.i.i.d* (*statistically independent and identically distributed*). Untuk itu kita harus memilih analisis dengan model proses *stochastic* seperti *Homogeneous poisson process* (HPP), *Non homogeneous poisson process* (NHPP), atau *General renewal process* (GRP).

Kita ketahui bahwa *engine* adalah sebuah sistem dinamis yang mengalami keausan sejalan dengan waktu. Keausan tersebut berdampak terhadap penurunan *performance* dan peningkatan *cost* (*maintenance cost, downtime cost, dll*). Karena keausan ini maka *engine* perlu di *overhaul*. Untuk itu perlu adanya penentuan kapan suatu *engine* harus di *overhaul*. Sangat sulit untuk menentukan kapan suatu *engine* harus di-*overhaul*. Secara sederhana *optimum overhaul* dilakukan pada saat terjadi titik *optimum* baik dari segi *cost* maupun *performance*. Jika penurunan *performance* dan peningkatan *cost* dapat dimodelkan terhadap waktu

maka titik *optimum overhaul* akan terjadi pada saat *average sistem cost minimum*, atau dengan persamaan matematik dibuktikan terjadi pada saat *average sistem cost* sama dengan *instantaneous maintenance cost* (Crow, 2006).

Non homogeneous poisson process dengan model Power Law digunakan sebagai metode pendugaan awal *intensitas failure* yang menggambarkan penurunan *performance engine*. Jika model ini tidak sesuai maka digunakan model GRP (*General Renewal Process*) untuk menggambarkan penurunan *performance engine*. Persamaan tersebut dipadukan dengan data *maintenance cost* digunakan untuk menentukan titik *optimal engine* di *overhaul*.

1.2. Diagram Keterkaitan Masalah



Gambar 1.1 Diagram Keterkaitan Masalah

1.3. Rumusan Permasalahan

Berdasarkan latar belakang dan diagram keterkaitan masalah di atas, maka pokok permasalahan yang akan dibahas dalam skripsi ini adalah belum adanya panduan dalam menentukan kapan suatu *engine* harus *overhaul* secara ekonomis. Sehingga perlu adanya pengukuran kehandalan *engine* dari alat tambang utama

dengan menggunakan analisa reliabilitas. Selanjutnya menentukan umur ekonomis dari *overhaul* dengan model *stochastic point process*.

1.4. Tujuan Penelitian

Tujuan dalam penelitian ini adalah merancang model *repairable systems* untuk menentukan waktu *optimum overhaul engine dumptruck HD 785-5*.

1.5. Batasan Masalah

Dalam penelitian ini dilakukan pembatasan masalah agar jelas ruang lingkup pelaksanaan penelitian sehingga tujuan dari penelitian ini dapat tercapai. Batasan masalah pada penelitian ini adalah :

1. Penelitian ini dilakukan terhadap *engine dump truck* tipe HD785-5. Pemilihan ini berdasarkan alat tambang yang paling banyak digunakan PAMA. Sedangkan *engine* merupakan komponen utama dan paling berpengaruh terhadap sistem alat angkut.
2. Analisis yang digunakan adalah *reliability analysis in repairable system* dengan model *stochastic point process*. Model yang dipilih adalah NHPP Power Law dan GRP (*General Renewal Process*).
3. Penelitian ini dibatasi pada PAMA distrik Indominco di Kalimantan Selatan.

1.6. Metodologi Penelitian

Metode penelitian yang digunakan dalam skripsi ini secara sistematis adalah sebagai berikut :

- Penentuan topik penelitian

Adapun topik dalam penelitian ini adalah *reliabilitas analysis in repairable system* dalam menentukan waktu *optimum overhaul (To)*.

- Penentuan landasan teori

Pada tahap ini penulis menentukan landasan teori yang berhubungan dengan topik sebagai dasar dalam pelaksanaan penelitian. Landasan teori ini kemudian akan dijadikan acuan dalam pelaksanaan tugas akhir. Adapun landasan teori yang terkait antara lain *Reliabilitas Analysis*;

Stochastic Point Process; Repairable Systems; Probability Distribution; Economical Life Model for Repairable Systems.

- Pengumpulan data

Pengumpulan data dalam penelitian ini berasal data sekunder yang berasal dari data WO (*Work Order*) yang merupakan data historis dumptruck Setelah itu melakukan pengumpulan data yang berhubungan dengan topik penelitian. Dalam penelitian ini data yang diperlukan adalah :

- *Failure time* dari engine
- Biaya *maintenance*
- Biaya *overhaul*
- Jam pekerja/*operator*
- Biaya operator

- Pengolahan data

Pada tahap ini penulis mengolah hasil pengumpulan data dengan :

- a. Memodelkan data dengan asumsi awal berdasarkan model Power Law NHPP.
- b. Melakukan uji statistik *cramér-von mises*.
- c. Memodelkan data dengan model GRP I.
- d. Memodelkan data dengan model GRP II.
- e. Memilih model terbaik berdasarkan nilai indikator LKV.
- f. Menggunakan hasil parameter dari model yang dipilih untuk menentukan *economic life for overhaul* dengan rumus titik *optimum overhaul* (T_o) yang merupakan hasil penurunan rumus dari biaya dan fungsi reliabilitas.

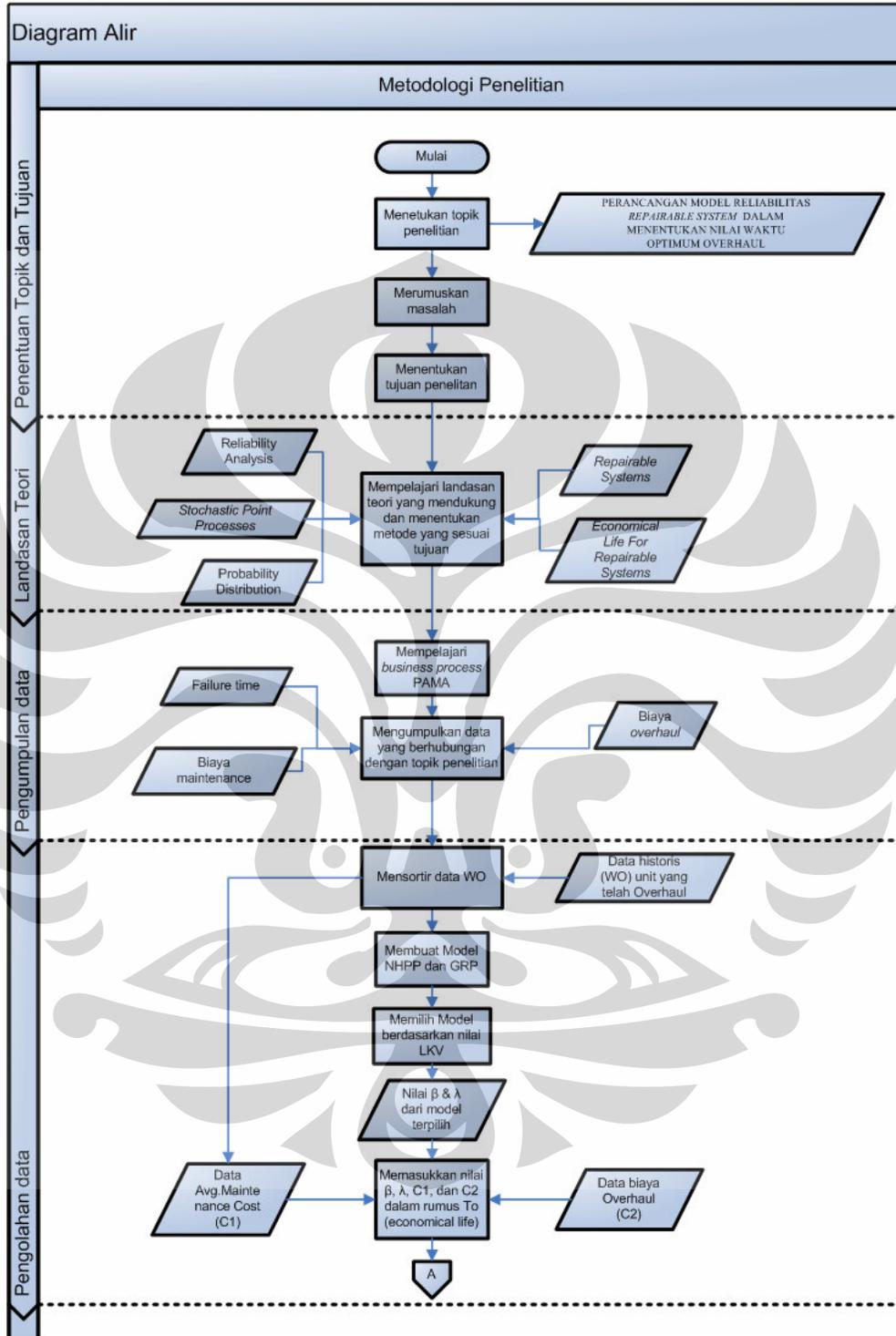
- Analisis data

Pada tahap ini dilakukan analisis terhadap hasil pengolahan data untuk memperoleh tujuan penulisan skripsi.

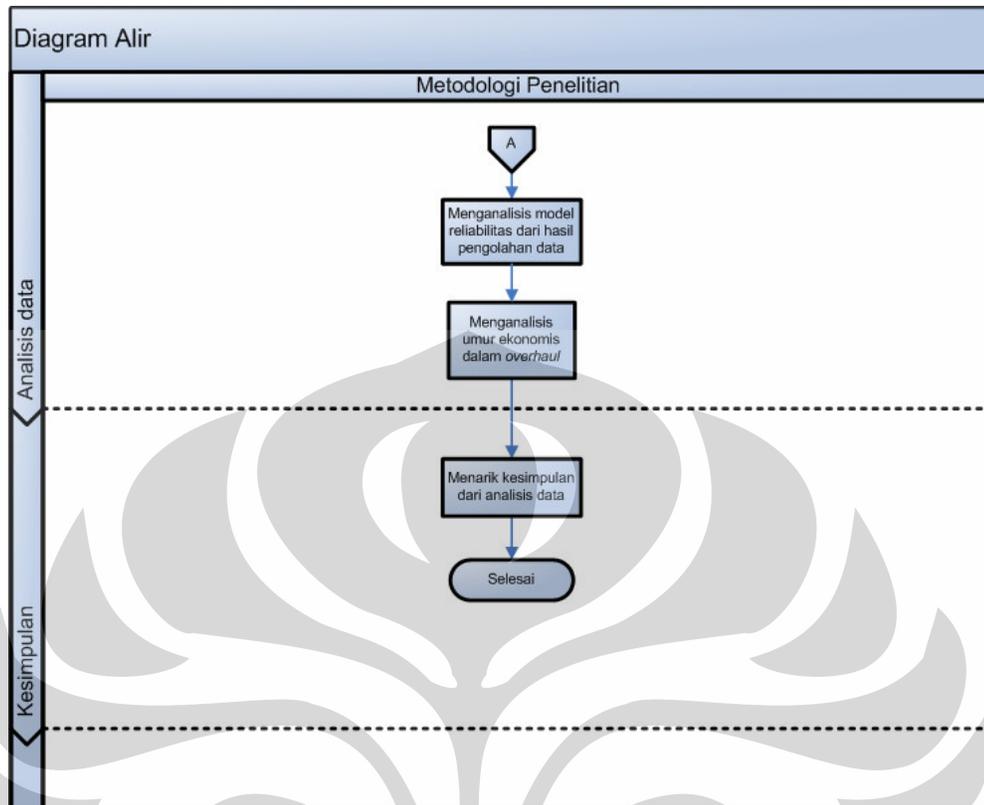
- Kesimpulan dan saran

Pada tahapan ini akan dihasilkan kesimpulan mengenai keseluruhan penelitian tugas akhir serta saran sebagai masukan yang berguna untuk pihak PAMA.

Berikut ini adalah diagram alir metodologi penelitian yang dilakukan penulis:



Gambar 1.2 Diagram Alir Metodologi Penelitian



Gambar 1.3 Diagram Alir Metodologi Penelitian (*lanjutan*)

1.7. Sistematika Penulisan

Secara umum, pembahasan penelitian ini terdiri dari beberapa bab dengan sistematika sebagai berikut:

Bab 1 merupakan bab pendahuluan yang menjelaskan mengenai latar belakang dilakukannya penelitian ini, diagram keterkaitan masalah, rumusan permasalahan, tujuan penelitian, batasan masalah, metodologi penelitian, dan sistematika penulisan.

Bab 2 merupakan landasan teori yang berhubungan dengan penelitian ini. Landasan teori yang dibahas meliputi *Reliability Analysis; Stochastic Point Process; Repairable Systems; Probability Distribution; Economical Life Model for Repairable Systems*.

Bab 3 berisi tentang pelaksanaan pengumpulan data dan model yang digunakan. Pada bab ini akan dibahas profil singkat PAMA, contoh pengumpulan data, serta langkah-langkah pengolahan data.

Bab 4 berisi pengolahan data dan analisis. Pengolahan data sesuai dengan langkah-langkah yang telah di jelaskan di bab sebelumnya. Analisa dilakukan di setiap pengolahan data.

Bab 5 merupakan kesimpulan dari keseluruhan penelitian ini. Kesimpulan yang diambil akan meliputi keseluruhan hasil pengolahan data dan analisis.



2. LANDASAN TEORI

2.1. Sistem Dan Kegagalan

Suatu sistem adalah suatu koleksi subsistem, atau komponen-komponen mengatur di suatu desain yang spesifik untuk mencapai kemampuan yang diinginkan¹. Dalam konteks reliabilitas, sistem terbagi dalam *nonrepairable sistem* dan *repairable sistem*. Kegagalan komponen dalam sistem ini tidak akan menyebabkan terhentinya kerja sistem. Komponen yang ada didalam sistem ini akan dioperasikan kontinu sampai komponen tersebut mengalami kegagalan. Jika gagal, maka komponen akan di perbaiki atau diganti dalam konteks *repairable systems*. Jika komponen tersebut akan dibiarkan gagal karena tidak akan menyebabkan kegagalan fungsi sistem dalam konteks *nonrepairable systems*.

Penilaian terhadap *past performance* menjadi sangat bermanfaat dalam rangka mengidentifikasi kelemahan desain yang mungkin membutuhkan modifikasi, mengidentifikasi perubahan perilaku (*trend*) keandalan sistem, menentukan indeks keandalan saat ini sebagai acuan dalam penilaian keandalan di periode berikutnya, memungkinkan kita untuk membandingkan kinerja terdahulu dengan kondisi operasi yang sebenarnya serta dasar dalam memonitor respon jika dilakukan perubahan-perubahan terhadap desain sistem. Sementara itu, penilaian terhadap kinerja sistem di periode berikutnya (*future systems performance*) menjadi penting karena memungkinkan kita untuk memprediksi: bagaimana perilaku sistem dimasa yang akan datang, bagaimana efek dari kebijakan pemeliharaan dan operasional yang baru, bagaimana perilaku sistem jika dilakukan perubahan desain, hubungan antara keandalan terhadap biaya, manfaat, dan indikator kinerja sistem lainnya.

¹ ReliaSoft Corporation. (2008). *Avoiding a Common Mistake in the Analysis of Repairable Systems*. Maret 10, 2008. Reliability Edge, Volume 7, Issue 1, Tucson, AZ. <http://www.reliasoft.com/newsletter/v7i1/index.htm>

2.1.1. *Nonrepairable Systems*

Nonrepairable system adalah salah satu sistem yang dibuang kalau terjadi kerusakan. Salah satu contohnya adalah lampu. Jika terjadi kerusakan maka lampu akan diganti yang baru karena tidak mungkin diperbaiki. Selain itu terdapat pilihan untuk mengganti yang baru jika *fix cost* itemnya sangat besar.

Analisis yang digunakan dalam sistem ini merupakan analisis sebaran atau distribusi karena secara statistik tidak bergantung (independen) dan saling membagi. Maka ketika mengepas suatu sebaran, kita berasumsi bahwa kejadian itu secara statistik bebas dan dengan identik membagi-bagikan (*s.i.i.d.*).

2.1.2. *Repairable Systems*

Repairable system adalah sebuah sistem yang jika terjadi kerusakan dapat diperbaiki kembali ke kondisi operasi dengan proses perbaikan dibanding penggantian dalam keseluruhan sistem². Contoh sistem *repairable* ini antara lain *engine*, *power supply*, pompa, persenjataan, dan lain-lain. Umumnya yang digolongkan ke dalam sistem *repairable* adalah suku cadang dari mesin-mesin besar, alat-alat berat, pesawat terbang, kapal, kereta api dimana harga suku cadang tersebut relatif mahal dan jika mengalami kerusakan, tindakan perbaikan akan jauh lebih ekonomis daripada membuangnya dan memproduksi atau membeli yang baru. Dalam banyak literatur, istilah *repairable* juga sering disebut dengan istilah *recoverable*, *reparable*, *serviceable*, *replaceable*, atau *interchangeable*.

Sistem *repairable* memiliki perbaikan ketika komponen dalam sistem mengalami kegagalan. Perbaikan ini membuat perubahan dalam keseluruhan sistem dan mempengaruhi perbedaan *behavior* pada perbedaan perlakuan pemeliharaan. Pada dasarnya, terdapat dua kategori pemeliharaan, yaitu perbaikan korektif dan perbaikan pengendalian. Masing-masing dapat diklasifikasikan dalam ukuran tingkat kondisi perbaikan dari pemeliharaan yang mengikuti pola³:

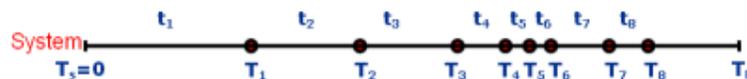
² Steven E. Rigdon & Asit P. Basu. (2000). *Statistical Methods for the Reliability of Repairable Systems*. New York: John Wiley & Sons, Inc.

³A. Mettas & Zhao, W. (2004). *Modeling and Analysis of Complex Repairable Systems*, Technique Report, Reliasoft Corporation: Annual Reliability and Maintainability Symposium.

- a. *Perfect repair/ maintenance*: tindakan pemeliharaan dimana memperbaiki kondisi sistem operasi seperti dalam keadaan baru (*as good as new*).
- b. *Minimal repair/ maintenance*: tindakan pemeliharaan dimana memperbaiki kondisi sistem operasi tanpa merubah keadaan (*as bad as old*).
- c. *Imperfet repair/ maintenance*: tindakan pemeliharaan dimana memperbaiki kondisi sistem operasi diantara keadaan baru dan lama (*between as good as new and as bad as old*).
- d. *Worse repair/ maintenance*: tindakan pemeliharaan dimana memperbaiki kondisi sistem operasi menjadi lebih buruk dari keadaan sebelumnya.
- e. *Worst repair/ maintenance*: tindakan pemeliharaan dimana membuat kondisi sistem operasi gagal.

Suatu sistem dapat diperbaiki atau memperbaiki sehingga metode analisis yang sesuai akan berbeda yang didasarkan pada pembedaan ini. Kekeliruan sering terjadi dalam analisis sistem yang dapat diperbaiki yaitu hanya dengan analisis sebaran dari waktu antara kegagalan. Dua metode yang lebih sesuai dengan analisis jenis ini yaitu sistem penelitian mengukur data dengan suatu model proses stokastik atau meneliti data tingkatan komponen dengan suatu bagan kotak keandalan (*reliability blok diagram*).

Umumnya kesalahan terjadi dalam penelitian sistem yang dapat diperbaiki ketika sedang mengepas suatu sebaran kepada data interarrival sistem itu. Interarrival data terdiri dari waktu antara kegagalan dari suatu sistem yang dapat diperbaiki, seperti yang ditunjukkan di dalam gambar yang berikut di mana T_i adalah waktu yang kumulatif kepada kegagalan dan t_i adalah waktu antar kegagalan = $T_i - T_{i-1}$ ⁴.



Gambar 2.1 *Interarrival data* Kegagalan

⁴ ReliaSoft Corporation. (2008). *Avoiding a Common Mistake in the Analysis of Repairable Systems*. Reliability Edge, Volume 7, Issue 1, Tucson, AZ. <http://www.reliasoft.com/newsletter/v7i1/index.htm>

Ketika mengepas suatu sebaran, kita berasumsi bahwa kejadian itu secara statistik bebas dan dengan identik membagi-bagikan (s.i.i.d.). Bagaimanapun, di suatu sistem yang dapat diperbaiki, kejadian (kegagalan-kegagalan) bukanlah bebas dan dalam banyak kasus tidak dengan identik dibagi-bagikan⁵. Ketika suatu kegagalan terjadi di suatu sistem yang dapat diperbaiki, komponen-komponen sisa mempunyai suatu usia yang ada. Peristiwa kegagalan yang berikutnya bergantung pada usia aktif ini. Dengan demikian kejadian kegagalan di tingkatan sistem bersifat saling tergantung.

2.2. *Statistical Distribution* dan Tipe Data

2.2.1. Distribusi Probabilitas

Eksperimen probabilitas memiliki keluaran yang bisa berupa suatu nilai numerik, hitungan, atau suatu hasil pengukuran. Variabel acak biasa ditandai dengan simbol X , adalah variabel yang memiliki sebuah nilai numerik tunggal untuk setiap keluaran dari sebuah eksperimen probabilitas. Nilai tertentu dari X dalam sebuah eksperimen adalah suatu kemungkinan keluaran yang acak. Variabel acak diskrit adalah variabel acak yang memiliki nilai yang dapat dicacah (*countable*). Sementara variabel acak kontinu memiliki nilai yang tak terhingga banyaknya sepanjang sebuah interval yang tidak terputus. Variabel acak kontinu biasanya diperoleh dari hasil pengukuran.⁶ Secara garis besar distribusi probabilitas terbagi menjadi diskrit dan kontinu. Selanjutnya akan dibahas mengenai distribusi probabilitas kontinu karena data dari penelitian ini berupa waktu yang merupakan hasil pengukuran.

2.2.1.1. Fungsi Kepadatan Probabilitas Kontinu

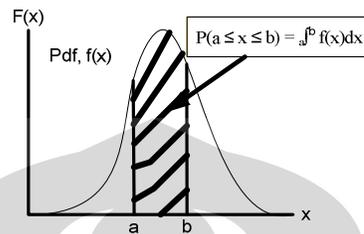
Secara teoritis untuk variable acak kontinu, kurva distribusi probabilitas populasi diwakili oleh polygon frekuensi relative yang dimuluskan. Kurva ini dapat dinyatakan oleh suatu fungsi kontinu, misalnya $f(x)$. Fungsi $f(x)$ ini disebut sebagai fungsi kepadatan probabilitas (*probability density function/ pdf*). Secara imajinatif dapat dibayangkan bahwa fungsi kepadatan probabilitas (*pdf*)

⁵ *Ibid.*

⁶ Harinaldi. (2005). *Prinsip-Prinsip Statistik untuk Teknik dan Sains*. Jakarta: Penerbit Erlangga.

menggambarkan besarnya probabilitas per unit interval nilai variable acaknya. Secara matematik fungsi ini dinotasikan sebagai berikut:

$$P(a \leq x \leq b) = p(a \leq x \leq b) = \int_a^b f(x)dx \quad (2.1)$$



Gambar 2.2 Kurva *PDF*

Dari gambar di atas dapat dipahami bahwa agar sebuah fungsi $f(x)$ dapat menjadi sebuah pdf dari suatu variable acak kontinu harus memenuhi syarat:

1. Fungsi kepadatan probabilitas (pdf): $f(x) \geq 0$ (non - negatif).
2. Integral $\int_{-\infty}^{\infty} f(x)dx = 1$ (luas total daerah di bawah kurva $f(x) = 1$).

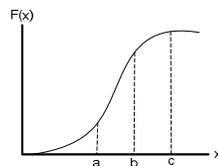
Melalui analogi matematis dengan variable acak diskrit, dapat dianggap yang menjadi fungsi probabilitas (pf) untuk variable acak kontinu adalah $f(x)dx$ sehingga berlaku $0 \leq f(x)dx \leq 1$. Untuk penentuan nilai probabilitas hanya bisa dilakukan untuk suatu interval nilai dari variable acaknya karena probabilitas untuk suatu nilai variable tertentu adalah $P(x=c)=p(c)=\int_c^c f(x)dx = 0$.

2.2.1.2. Fungsi Distribusi Kumulatif

Untuk setiap fungsi kepadatan probabilitas $f(x)$ terdapat sebuah fungsi terkait $f(x)$ yang disebut fungsi distribusi kumulatif (*cdf*), yang didefinisikan sebagai:

$$F(x) = P(X \leq x) = \int_{-\infty}^x f(t)dt \quad (2.2)$$

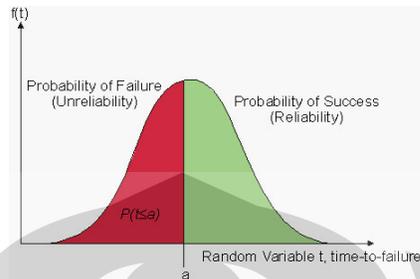
Fungsi ini tidak lain menyatakan probabilitas bahwa X kurang dari sebuah nilai tertentu. Pada gambar di bawah ini dapat dilihat fungsi distribusi kumulatif (*cdf*).



Gambar 2.3 Kurva *CDF*

2.2.2. Fungsi Reliabilitas

Fungsi reliabilitas dapat diturunkan secara langsung dari fungsi *cdf* (*cumulative density function*). Perhatikan gambar berikut:



Gambar 2.4 *Reliability Vs Unreliability*

Sesuai gambar di atas maka dapat dirumuskan fungsi *unreliability* dinotasikan sebagai berikut:

$$Q(t) = F(t) = \int_0^t f(s) ds \quad (2.3)$$

Sedangkan hubungan antara fungsi *unreliability* $Q(t)$ dengan fungsi *reliability* $R(t)$ adalah:

$$\begin{aligned} Q(t) + R(t) &= 1 \\ R(t) &= 1 - Q(t) \\ R(t) &= 1 - \int_0^t f(s) ds \\ R(t) &= \int_t^{\infty} f(s) ds \end{aligned} \quad (2.4)$$

a. *Conditional Reliability Function*

Fungsi yang menunjukkan *reliability* suatu komponen/subsistem pada waktu tertentu (T) setelah diketahui bahwa komponen/subsistem tersebut *reliable* (bertahan hidup) selama t .

$$R(T, t) = \frac{R(T+t)}{R(T)} \quad (2.5)$$

b. *Failure Rate Function*

Dengan failure rate, kita dapat memprediksi jumlah *failure* (kegagalan) yang terjadi pada satu satuan waktu.

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (2.6)$$

c. *Mean Life Function*

Suatu fungsi yang menunjukkan rata-rata waktu operasi suatu subsystem/komponen sebelum *fail* (*reject*).

$$\bar{T} = m = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt \quad (2.7)$$

Fungsi di atas adalah fungsi untuk menentukan MTTF (*mean time to failure*). MTTF berbeda dengan MTBF, MTBF hanya akan sama dengan MTTF apabila memiliki *failure rate* yang konstan. MTBF digunakan untuk suatu subsystem/ komponen yang *repairable*.

d. *Median Life Function*

Median life adalah nilai *random variable* (T) yang persis membelah fungsi *pdf* menjadi dua bagian yang sama. *Median Life* adalah pusat dari sebaran (*random variable distribution*).

e. *Mode (Modus) Life Function*

Adalah nilai *random variable* (T) yang memiliki nilai peluang terbesar dalam fungsi sebaran *pdf*.

f. *Mean Time To Failure (MTTF)*

Adalah nilai rata-rata waktu menuju ke kegagalan berikutnya.

$$MTTF = \int R(t) dt = 1/\lambda \quad (2.8)$$

Dimana R adalah fungsi *reliability* dan λ adalah *failure rate*.

g. *Repair Rate Function*

Dengan *repair rate*, kita dapat memprediksi jumlah *repair* (perbaikan) yang terjadi pada satu satuan waktu dan memiliki simbol μ .

h. *Mean Time To Repair (MTTR)*

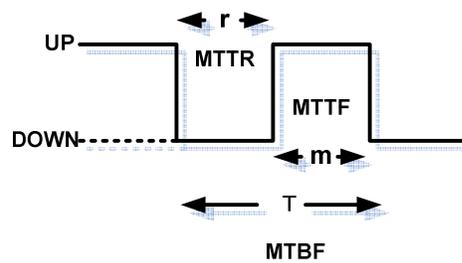
Adalah nilai rata-rata waktu menuju ke perbaikan berikutnya.

$$MTTR = 1/\mu \quad (2.9)$$

i. *Mean Time Between Failure (MTBF)*

Adalah nilai rata-rata waktu antara kegagalan yang satu ke lainnya.

$$\begin{aligned} MTBF &= MTTF + MTTR \\ T &= r + m \end{aligned} \quad (2.10)$$



Gambar 2.5 Hubungan *MTBF*, *MTRR*, *MTTF*
(Sumber: Billinton, Roy & Ronald N. 1987)

2.2.3. Tipe Data

2.2.3.1. *Random variable*

Continuous random variable merupakan data hasil pengukuran. Dalam data ini satuan pengukuran adalah waktu. Contoh, data *Time to Failure (TTF)* Tire dapat bernilai dari 0 sampai dengan ∞ . Tipe data ini terdapat empat jenis, yaitu:

- Exact value* adalah nilai yang pengukuran sebenarnya. Contohnya nilai *TTF Tire* adalah : 1000, 3500, 6000, ... T_n
- Interval Censoring* dimana nilai *TTF Tire* adalah : (6500 – 8000), (7000 – 8000). Data ini memiliki interval tertentu.
- Right Censoring* dimana nilai *TTF Tire* adalah: > 5000 , > 7000, ...
- Left Censoring* dimana nilai *TTF Tire* adalah: < 5000, < 7000, ...

2.2.3.2. *Discrete random variable*

Yaitu data yang bernilai salah satu dari 2 kemungkinan (1 , 0) . Contohnya adalah 0 = *defect*, 1 = *non defect*.

2.3. Reliabilitas

2.3.1. Definisi Reliabilitas

Berbagai literatur memberikan definisi yang beragam terhadap reliabilitas. Namun demikian, ada beberapa kesamaan di dalam definisi tersebut, khususnya parameter tetap yang terkandung dalam definisi tersebut. Parameter tersebut adalah peluang, sistem/komponen, tidak gagal, waktu, dan kondisi operasi. Jika kita berbicara reliabilitas kuantitatif, maka kita berbicara dalam konteks peluang (*probability*). Peluang yang merepresentasikan indeks reliabilitas memiliki

rentang nilai 0 (nol) sampai dengan 1 (satu). Reliabilitas sistem bernilai 0 berarti memiliki peluang sukses (tidak gagal) 0% dan reliabilitas sistem bernilai 1 memiliki peluang sukses 100%. Nilai reliabilitas ini adalah fungsi waktu, artinya reliabilitas sebuah sistem akan bervariasi sesuai dengan waktu dimana evaluasi reliabilitas tersebut dilakukan. Sistem yang sama dan diukur saat waktu operasi yang sama akan mungkin memiliki reliabilitas yang berbeda jika kondisi operasi kedua sistem sejenis tersebut berbeda

Reliabilitas adalah "kualitas beralih/bertukar waktu".⁷ Pemakaian yang sehari-hari istilah "kualitas suatu hasil" dengan bebas diambil untuk berarti derajat tingkat tidak bisa dipisahkan dari keunggulan. Di dalam industri, istilah kualitas dijelaskan sebagai "*conformance* kepada persyaratan-persyaratan di awal berguna". Mengumpamakan spesifikasi hasil cukup menangkap persyaratan-persyaratan pelanggan, tingkatan kualitas sekarang dapat dengan tepat diukur oleh pecahan satuan-satuan yang sesuai spesifikasi.

Suatu gambar hidup sebagai ganti suatu *snapshot*. Tetapi berapa banyak satuan-satuan ini masih sesuai spesifikasi setelah suatu minggu operasi? Atau setelah suatu bulan, atau pada akhir satu tahun kala jaminan keabsahan? Yang di mana "reliabilitas" masuk. Kualitas adalah suatu snapshot di awal tentang hidup dan reliabilitas adalah suatu gambar hidup operasi *day-by-day*⁸. Tingkatan kualitas boleh jadi digambarkan oleh suatu nisbah cacat. Untuk menguraikan jatuhnya radio aktif reliabilitas suatu model kemungkinan bahwa menguraikan jatuhnya radio aktif pecahan dari waktu ke waktu diperlukan. Hal ini dikenal sebagai sebaran hidup model.

Reliabilitas adalah suatu faktor ekonomi yang utama di dalam menentukan suatu sukses hasil keakuratan ramalan dan kendali dari reliabilitas memainkan satu peran yang penting di dalam profitabilitas suatu hasil. Biaya-biaya layanan untuk hasil-hasil di dalam kala jaminan keabsahan atau di bawah suatu kontrak jasa adalah suatu biaya yang utama dan suatu faktor penetapan harga yang penting. Perusahaan dapat secara ekonomis mendisain dan menjual hasil-hasil

⁷ NIST U.S. Commerce Department's Technology Administration. (2006, July 18). *Engineering Statistics Handbook*. April 4, 2008. <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook>

⁸ *Idiom*.

sesuai harapan-harapan reliabilitas pelanggan mereka mempunyai suatu manfaat kompetisi yang kuat di dalam pasar hari ini.

Reliability engineering memiliki 4 unsur utama dalam pengertiannya:

1. *Reliability* adalah probabilitas, ini berarti kegagalan;
2. *Reliability* dapat diprediksi sebagai "Fungsi yang diharapkan". biasanya ditandai dengan rata-rata operasi tanpa kegagalan;
3. *Reliability* dipakai pada waktu yang telah ditentukan;
4. *Reliability* dibatasi untuk operasi dibawah kondisi yang telah ditetapkan (*under state*).

2.3.2. Analisis Sebaran

Dalam fungsi reliabilitas terutama dalam analisis untuk *nonrepairable systems* digunakan analisis sebaran. Dalam makalah ini hanya diberikan dua analisis yang paling umum digunakan dalam *nonrepairable systems*.

2.3.2.1. Distribusi Eksponensial

Distribusi eksponensial merupakan kasus khusus dari distribusi gamma dengan factor bentuk $\alpha = 1$ dan faktor skala $\beta = 1/\lambda$. Fungsi yang terdapat dalam distribusi ini adalah:

Fungsi pdf :

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (2.11)$$

Fungsi *reliability*:

$$\begin{aligned} R(t) &= 1 - \int_0^t \lambda e^{-\lambda T} dT \\ &= 1 - [1 - e^{-\lambda t}] \\ &= e^{-\lambda t} \end{aligned} \quad (2.12)$$

Fungsi *failure rate*:

$$\begin{aligned} \lambda(t) &= \frac{f(t)}{R(t)} \\ &= \frac{\lambda e^{-\lambda(t)}}{e^{-\lambda(t)}} \\ &= \lambda \end{aligned} \quad (2.13)$$

Fungsi *mean life*:

$$\begin{aligned}\bar{T} &= \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt \\ &= \int_0^{\infty} t \cdot \lambda \cdot e^{-\lambda t} dt \\ &= \frac{1}{\lambda}\end{aligned}\tag{2.14}$$

2.3.2.2. Distribusi Weibull

Distribusi weibull pertama kali diperkenalkan oleh ahli fisika dari Swedia Walodi Weibull pada tahun 1939. Dalam aplikasinya, distribusi ini sering digunakan untuk memodelkan “waktu sampai kegagalan (*time to failure*)” dari suatu sistem fisika. Ilustrasi yang khas, misalnya yaitu pada sistem dimana jumlah kegagalan meningkat dengan berjalannya waktu (misalnya keausan bantalan), berkurang dengan berjalannya waktu (misalnya daya hantar semikonduktor) atau kegagalan yang terjadi oleh suatu kejutan (*shock*) pada sistem. Distribusi ini terbagi dalam tiga jenis, yaitu:

a. Weibull 3-parameter, memiliki fungsi *pdf*:

$$f(T) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{T - \gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{T - \gamma}{\eta} \right)^{\beta}}\tag{2.15}$$

dimana,

$$f(T) \geq 0, T \geq 0 \text{ or } \gamma, \beta > 0, \eta > 0, -\infty < \gamma < \infty,\tag{2.16}$$

dengan keterangan:

- η = *scale parameter* (parameter skala),
- β = *shape parameter or slope* (parameter bentuk),
- γ = *location parameter* (parameter lokasi).

b. Weibull 2-parameter, dimana parameter $\gamma = 0$ memiliki fungsi *pdf*:

$$f(T) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{T}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{T}{\eta} \right)^{\beta}}\tag{2.17}$$

2.3.3. Model *Stochastic Point Process*

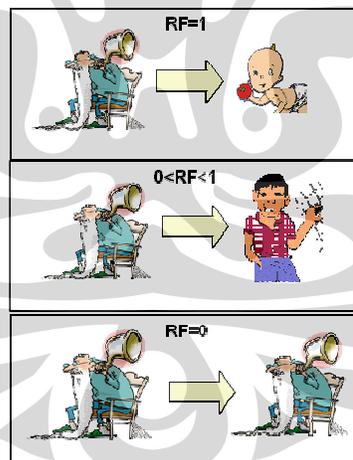
Point Processes merupakan model stokastik yang menggambarkan kejadian dari peristiwa dalam waktu. Kejadian ini merupakan poin dari axis waktu. Pada umumnya, waktu antara kejadian tidak independen dan tidak identik dengan terdistribusi, dengan kata lain model ini tidak mengikuti pola *s.i.i.d* (*statistically independent and identically distributed*). Jumlah kegagalan dalam interval $[a,b]$ menjadi :

$$N [a,b] = N(b) - N(a) \quad (2.18)$$

Model stochastic point process sebagai pendekatan pada sistem *repairable* terdiri dari:

- Renewal process / Homogeneous poisson process*,
- Nonhomogeneous poisson process (NHPP)*,
- Generalized renewal process (GRP)*.

Perbedaan dari ketiga model tersebut dapat dijelaskan melalui ilustrasi gambar di bawah ini. Pada dasarnya ketiga model tersebut dibedakan menurut tingkat *restoration factor (RF)*.



Gambar 2.6 *Restoration Factor*

Tingkat *restoration factor* bernilai 1 artinya jika ada perbaikan maka sistem dapat kembali baru seperti semula. Jika dianalogikan seperti seorang kakek yang diobati akan kembali seperti bayi lagi. Sedangkan untuk tingkat *restoration factor (RF)* sama dengan 0 maka sistem yang diperbaiki akan tetap berada pada umurnya artinya tidak ada perubahan namun fungsi sistem dapat terus berjalan.

2.3.3.1. Renewal Process / Homogeneous Poisson Process

Jika sistem dalam pemeliharaannya diperbaiki seperti dalam keadaan baru (*as good as new*) maka proses kegagalan disebut sebagai *renewal process*. Pada proses ini waktu antara kegagalan adalah independent dan terdistribusi secara sama (*s.i.i.d.*).

Kasus khusus dalam *homogeneous poisson process (HPP)*, dimana tidak saling tergantung dan mengikuti pola eksponensial dalam waktu antara kegagalan.

Proses perhitungan dalam HPP dengan parameter $\lambda > 0$ jika:

- $N(0) = 0$
- Proses memiliki kenaikan yang tidak saling tergantung (independen)
- Jumlah kegagalan di setiap interval dengan panjang t terdistribusi secara *poisson* dengan parameter λt .

Ada beberapa maksud dari pengertian proses poisson. Distribusi dari jumlah kejadian dalam $[t_1, t_2]$ memiliki distribusi poisson dengan parameter $\lambda (t_2 - t_1)$. Oleh karena itu, probabilitas fungsi massa (*pmf*) adalah:

$$P[N(t_2) - N(t_1) = n] = \frac{[\lambda(t_2 - t_1)]^n e^{-\lambda(t_2 - t_1)}}{n!} \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (2.19)$$

Bilangan yang diharapkan dari kegagalan terhadap waktu t adalah $\Lambda(t) - E[N(t)] = \lambda t$, dimana λ disebut sebagai *failure intensity*. Oleh karena itu fungsi intensitas $u(t) = \Lambda'(t) = \lambda$. Jika x_1, x_2, \dots , tidak saling tergantung (independen) dan terdistribusi sama secara variabel random eksponensial, maka $N(t)$ cocok dengan poisson proses.

2.3.3.2. Nonhomogeneous Poisson Process (NHPP)

Sebagai model proses stokastik yang paling umum dipakai dalam *reliability engineering*, *NHPP models* memiliki keberhasilan dalam permasalahan reliabilitas. *NHPP models* secara khusus digunakan untuk menggambarkan proses gagal dengan memiliki trend tertentu, seperti reliabilitas dalam masa pertumbuhan (*growth/improving*) atau kemunduran (*deterioration*). Kumulatif bilangan dari kegagalan terhadap waktu t , $N(t)$, dapat digambarkan dengan NHPP. Proses perhitungan $\{N(t), t \geq 0\}$ dengan model NHPP, $N(t)$ mengikuti distribusi poisson dengan parameter $\Lambda(t)$. Probabilitas $N(t)$ secara integer n ditunjukkan dengan:

$$P\{N(t) = n\} = \frac{[\Lambda(t)]^n}{n!} e^{-\Lambda(t)}, n = 0, 1, 2, \dots \quad (2.20)$$

$\Lambda(t)$ adalah fungsi rata-rata. Fungsi $\Lambda(t)$ menggambarkan kumulatif bilangan kegagalan yang diharapkan. Berikut adalah asumsi yang digunakan dalam NHPP:

- $N(0)=0$
- $\{N(t), t \geq 0\}$ memiliki kenaikan yang tidak saling tergantung (independen)
- $P\{N(t+h)-N(t) = 1\} = u(t) + 0(h)$
- $P\{N(t+h)-N(t) \geq 2\} = 0(h)$

Probabilitas kejadian n terjadi dalam interval $[a, b]$ adalah:

$$P\{N(b) - N(a) = n\} = \frac{\left[\int_a^b u(t) dt \right]^n}{n!} e^{-\int_a^b u(t) dt} \quad \text{for } n = 0, 1, \dots \quad (2.21)$$

$0(h)$ menunjukkan kuantitas dimana kecenderungan mendekati 0 dengan nilai h yang kecil. Fungsi $u(t)$ merupakan *failure intensity*. Dengan $u(t)$, nilai fungsi rata-rata $\Lambda(t) = E[N(t)]$ memenuhi:

$$\Lambda(t) = \int_0^t u(s) ds \quad (2.22)$$

Ratio dalam perbandingan terbalik, mengetahui $\Lambda(t)$, *failure intensity* pada waktu t dapat diperoleh dengan rumus:

$$u(t) = \frac{d\Lambda(t)}{dt} \quad (2.23)$$

Salah satu bentuk paling umum dari *failure intensity* yang digunakan dalam analisis reliabilitas pada *repairable systems*, adalah model Crow(AMSAA)/Power law, dengan bentuk persamaan:

$$\begin{aligned} u(t) &= \lambda \beta t^{\beta-1} \\ E(N(t)) &= \lambda t^\beta \end{aligned} \quad (2.24)$$

Dimana,

$N(t)$: jumlah kegagalan yang diamati dalam interval waktu $(0, t)$

$U(t)$: *failure intensity* (kadang disebut sebagai “*instantaneous failure rate*”)

λ, β : parameter dalam model dimana ($\lambda > 0, \beta > 0$).

a. Perhitungan data *failure truncated*

Umumnya proses dikatakan sebagai *failure truncated* jika pengamatan dilakukan sampai bilangan kegagalan tertentu. Proses dikatakan sebagai *time truncated* jika pengamatan dilakukan sampai waktu tertentu. Jika proses kegagalan mengikuti *Weibull process* (power law model) dan pengujian data dipotong pada kegagalan n tertentu dengan $0 < t_1 < t_2 < \dots < t_n$ menunjukkan waktu kegagalan berturut-turut, dengan fungsi likelihood sebagai berikut:

$$L(t_1, t_2, \dots, t_n, \lambda, \beta) = \lambda^n \beta^n \exp(-\lambda t_n^\beta) \prod_{i=1}^n t_i^{\beta-1} \quad (2.25)$$

Maximum likelihood estimates (MLE) untuk perhitungan β dan λ , adalah:

$$\hat{\beta} = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \ln(t_n/t_i)}$$

$$\hat{\lambda} = \frac{n}{t_n^\beta} \quad (2.26)$$

b. Perhitungan data *time truncated*

Umumnya proses dikatakan sebagai *time truncated* jika pengamatan dilakukan sampai waktu tertentu. Beberapa perhitungan dan kesimpulan hampir sama dengan data *failure truncated*. Jika proses kegagalan mengikuti *Weibull process* (power law model) dan pengujian data dipotong pada kegagalan n tertentu dengan $0 < t_1 < t_2 < \dots < T$ menunjukkan waktu kegagalan berturut-turut, dengan fungsi likelihood sebagai berikut:

$$f(t_1, t_2, \dots, t_n, \lambda, \beta) = \lambda^n \beta^n \exp(-\lambda T^\beta) \prod_{i=1}^n t_i^{\beta-1} \quad (2.27)$$

Maximum likelihood estimates (MLE) untuk perhitungan β dan λ , adalah:

$$\hat{\beta} = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \ln(T/t_i)}$$

$$\hat{\lambda} = \frac{n}{T^\beta} \quad (2.28)$$

c. Perhitungan data *multiple systems*

Ketika data berasal dari banyak sistem, sangat penting untuk memodifikasi perhitungan λ dan β . Andaikata ada system sebanyak q diamati secara kontinu dari waktu S_q sanpai T_q ($q = 1, \dots, k$). Dengan metode *maximum likelihood*, nilai λ dan β adalah:

$$\hat{\lambda} = \frac{\sum_{q=1}^k N_q}{\sum_{q=1}^k (T_q^\beta - S_q^\beta)}$$

$$\hat{\beta} = \frac{\sum_{q=1}^k N_q}{\hat{\lambda} \sum_{q=1}^k (T_q^\beta \ln T_q - S_q^\beta \ln S_q) - \sum_{q=1}^k \sum_{i=1}^{N_q} \ln X_{iq}} \quad (2.29)$$

2.3.3.3. *General Renewal Process* (Kijima Model 1)

Kijima⁹ mengembangkan model *imperfect repair* (GRP) dengan menggunakan pemikiran proses umur sebenarnya pada sistem *repairable*. Jika sistem memiliki umur sebenarnya $V_{n-1} = y$ dengan segera setelah $(n-1)$ perbaikan, jumlah waktu kegagalan X , diasumsikan memiliki fungsi distribusi:

$$\Pr(X_n < X | V_{n-1} = y) = \frac{F(X+Y) - F(y)}{1 - F(Y)} \quad (2.30)$$

Dimana $F(x)$ adalah fungsi distribusi waktu gagal dari sistem baru. Umur sebenarnya dari sistem adalah $S_n = \sum_{i=1}^n X_i$. Jika q adalah derajat dari n perbaikan dimana $0 \leq q \leq 1$ dan umur sebenarnya dari sistem baru $V_0 = 0$. Jadi, umur sebenarnya setelah n perbaikan menjadi:

$$V_n = V_{n-1} + qX_n \quad (2.31)$$

Sedemikian:

$$V_n = q(X_1 + X_2 + \dots + X_n) \quad (2.32)$$

Jumlah kegagalan yang diperkirakan dalam interval waktu $[0, t]$ adalah dengan persamaan *g-renewal*¹⁰:

⁹ M. Kijima. (1989). Some results for repairable systems with general repair. *Journal of Applied Probability*, 20, 851-859.

¹⁰ M. Kijima & Sumita, N. (1986). A useful generalization of renewal theory counting process governed by non-negative Markovian increments. *Journal of Applied Probability*, 23, 71-88.

$$H(t) = \int_0^t \left(g(t|0) + \int_0^t h(x)g(t-x|x)dx \right) dt \tag{2.33}$$

dimana :

$$g(t|x) = \frac{f(t+qx)}{1-F(qx)}, \quad t, x \geq 0 \tag{2.34}$$

Karena tidak mungkin untuk memperoleh bentuk solusi tertutup, Kaminskiy dan Kristov¹¹ mengusulkan perkiraan solusi untuk persamaan *g-renewal* menggunakan teknik simulasi Monte Carlo. Misalkan sebuah contoh independen dan sistem *repairable* diamati dalam interval waktu secara diskrit selama periode waktu [0,t]. Fungsi intensitas kumulatif $\Lambda_e(t)$ dapat di estimasi pada akhir interval $t_i, i = 1, \dots, n$:

$$\Lambda_e(t) = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k N_j(t_i) \tag{2.35}$$

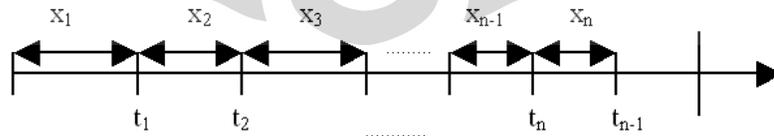
Dimana $N_j(t_i)$ adalah jumlah kegagalan dari j sistem dalam waktu $[0, t_i]$ dan k adalah jumlah sistem pada $t = 0$.

2.3.3.4. *General Renewal Process* (Kijima Model II)

Dalam sistem *repairable*, pengamatan dari waktu $t = 0$. Ditunjukkan dengan t_1, t_2, \dots adalah waktu kegagalan berturut-turut dan waktu antara kegagalan ditunjukkan dengan x_1, x_2, \dots . Dengan demikian:

$$x_i = t_i - t_{i-1}, \quad i = 1, 2, \dots$$

di mana kita tentukan $t_0 = 0$. Rangkaian t_1, t_2, \dots adalah waktu kehilangan terjadi sedangkan rangkaian x_1, x_2, \dots adalah waktu antara kejadian kehilangan (*time between failure*).



Gambar 2.7 Struktur Sistem *Repairable*

Dalam model Kijima I dikatakan bahwa n perbaikan dapat menghilangkan kedatangan kerusakan hanya selama waktu antara $(n-1)$ dan n kegagalan. Pada

¹¹ M.Kijima. *Op.cit.*

prakteknya n perbaikan tidak hanya tergantung pada $(n-1)$ perbaikan tetapi dapat bergantung pada semua perbaikan sebelumnya. Kita berasumsi bahwa tindakan perbaikan dapat menghilangkan semua akumulasi kerusakan pada n kegagalan, sehingga umur sebenarnya setelah n perbaikan menjadi:

$$V_n = q(V_{n-1} + x_n) \quad (2.36)$$

dimana q adalah derajat perbaikan yang nilainya, $0 \leq q \leq 1$. Nilai q memiliki hubungan dengan nilai *restoration factor* ($RF = 1 - q$). Dengan demikian:

$$\begin{aligned} V_0 &= 0 \\ V_1 &= qx_1 \\ V_2 &= q(qx_1 + x_2) \\ &\vdots \\ V_n &= q(q^{n-1}x_1 + q^{n-2}x_2 + \dots + x_n) \end{aligned} \quad (1) \quad (2.37)$$

Jika sistem memiliki umur sebenarnya $V_{n-1} = y$ dengan segera setelah $(n-1)$ perbaikan, n kegagalan dalam waktu X terdistribusi menurut fungsi densitas kumulatif (*cdf*):

$$F(X | V_{n-1} = y) = \frac{F(X + Y) - F(y)}{1 - F(Y)} \quad (2.38)$$

Pada model ini, jika $q = 0$ maka sesuai dengan model *perfect repair* (*as good as new*) sementara jika $q = 1$ maka sesuai dengan model *minimal repair* (*NHPP/ as bad as old*). Kasus dimana nilai $0 < q < 1$ maka sesuai dengan model *imperfect repair* (*better than old but worse than new*). Oleh karena itu q dapat menjadi indeks keefektifan perbaikan.

a. *Single Repairable System*

Metode *maximum likelihood estimation* sangat tepat digunakan untuk kasus dimana ketersediaan data cukup layak. Metode ini lebih tepat dibanding dengan metode simulasi monte carlo karena pada monte carlo dibutuhkan jumlah data yang sangat banyak dan butuh waktu lama untuk mengukur parameter. Jika t_1, t_2, \dots, t_n sebagai waktu antara kedatangan kegagalan $i-1$ dan i , dimana distribusi weibull untuk TTF (*Time To First Failure*), n waktu kegagalan terdistribusi dengan mengikuti *cdf*:

$$\begin{aligned}
F(t_i | V_{i-1} = v_{i-1}) &= \frac{F(x_i + v_{i-1}) - F(v_{i-1})}{1 - F(v_{i-1})} \\
&= \frac{e^{-\lambda v_{i-1}^\beta} - e^{-\lambda(x_i + v_{i-1})^\beta}}{e^{-\lambda v_{i-1}^\beta}} \\
&= 1 - e^{-\lambda[(x_i + v_{i-1})^\beta - v_{i-1}^\beta]}
\end{aligned} \tag{2.39}$$

Sedangkan syarat *probability distribution function* (pdf) adalah:

$$\begin{aligned}
f(t_i | t_{i-1}, t_i, \dots, t_1) &= f(t_i | t_{i-1}) \\
&= \lambda \beta (x_i + v_{i-1})^{\beta-1} \exp[-\lambda[(x_i + v_{i-1})^\beta - v_{i-1}^\beta]]
\end{aligned} \tag{2.40}$$

Dimana $t_i > t_{i-1}$. Fungsi likelihood adalah:

$$\begin{aligned}
L\{\text{data} | \lambda, \beta, \mathbf{q}\} &= f(t_1) f(t_2 | t_1) \cdots f(t_n | t_{n-1}) R(T | t_n) \\
&= \lambda^n \beta^n [e^{-\lambda[(T - t_n + v_n)^\beta - v_n^\beta]}]^\delta \prod_{i=1}^n [(x_i + v_{i-1})^{\beta-1} e^{-\lambda[(x_i + v_{i-1})^\beta - v_{i-1}^\beta]}]
\end{aligned} \tag{2.41}$$

$$\text{Where } \delta = \begin{cases} 0 & \text{If the test is failure truncated} \\ 1 & \text{If the test is time truncated} \end{cases}$$

Dengan menambah *natural log* pada kedua sisi, menjadi:

$$\begin{aligned}
\log L\{\text{data} | \lambda, \beta, \mathbf{q}\} &= n(\ln \lambda + \ln \beta) \\
&\quad - \lambda \delta [(T - t_n + v_n)^\beta - v_n^\beta] \\
&\quad - \lambda \sum_{i=1}^n [(x_i + v_{i-1})^\beta - v_{i-1}^\beta] + (\beta - 1) \sum_{i=1}^n \ln(x_i + v_{i-1})
\end{aligned} \tag{2.42}$$

Dimana v_i dapat diperoleh dari persamaan (2.38).

b. Multiple Systems

Jika terdapat k sistem, maka:

$$\text{Where } \delta = \begin{cases} 0 & \text{If the test is failure truncated} \\ 1 & \text{If the test is time truncated} \end{cases}$$

$$\begin{aligned}
L\{\text{data}|\lambda, \beta, q\} &= \prod_{l=1}^k f(t_{l,1})f(t_{l,2} | t_{l,1}) \cdots f(t_{l,n_l} | t_{l,n_l-1}) [R(T_l | t_{n_l})]^\delta \\
&= \prod_{l=1}^k \left[\lambda^{n_l} \beta^{n_l} \left[e^{-\lambda[(T_l - t_{l,n_l} + v_{l,n_l})^\beta - v_{l,n_l}^\beta]} \right]^\delta \right. \\
&\quad \left. \prod_{i=1}^{n_l} [(x_{l,i} + v_{l,i-1})^{\beta-1} e^{-\lambda[(x_{l,i} + v_{l,i-1})^\beta - v_{l,i-1}^\beta]}] \right]
\end{aligned} \tag{2.43}$$

Dengan menambah *natural log* pada kedua sisi, menjadi:

$$\begin{aligned}
\log L &= \sum_{l=1}^k n_l (\ln \lambda + \ln \beta) - \lambda \delta \sum_{l=1}^k [T_l - t_{l,n_l} + v_{n_l}]^\beta - v_{n_l}^\beta \\
&\quad - \lambda \sum_{l=1}^k \sum_{i=1}^{n_l} [(x_{l,i} + v_{l,i-1})^\beta - v_{l,i-1}^\beta] + (\beta - 1) \sum_{l=1}^k \sum_{i=1}^{n_l} \ln(x_{l,i} + v_{l,i-1})
\end{aligned} \tag{2.44}$$

c. Grouped Data

Tipe data kelompok digunakan untuk menguji dimana waktu kegagalan yang tepat tidak diketahui dan hanya jumlah kegagalan pada interval waktu tertentu saja yang diketahui. Sebagai contoh, tipe data ini dapat diaplikasikan ketika unit *multiple* berjalan dan uji unit diperiksa setelah menetapkan interval waktu dan jumlah kegagalan yang terekam. Fungsi *likelihood* adalah mengikuti:

$$\begin{aligned}
L\{\text{data}|\lambda, \beta, q\} &= \prod_{i=1}^k \frac{(\lambda(x_i + v_{i-1}))^\beta - \lambda v_{i-1}^\beta}{n_i!} e^{-(\lambda(x_i + v_{i-1})^\beta - \lambda v_{i-1}^\beta)}
\end{aligned} \tag{2.45}$$

Dengan menambah *natural log* pada kedua sisi, menjadi:

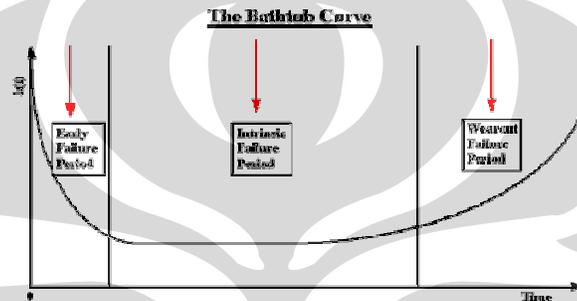
$$\begin{aligned}
\text{Log } L &= \sum_{i=1}^k \left[n_i \ln(\lambda(x_i + v_{i-1}))^\beta - \lambda v_{i-1}^\beta \right. \\
&\quad \left. - (\lambda(x_i + v_{i-1})^\beta - \lambda v_{i-1}^\beta) - \ln n_i! \right]
\end{aligned} \tag{2.46}$$

2.3.3.5. Power Law Model

Seperti penjelasan sebelumnya dalam model NHPP, power law merupakan *nonhomogeneous poisson process* dengan fungsi intensitas :

$$u(t) = \lambda \beta t^{\beta-1}$$

Parameter β mempengaruhi bagaimana sistem memburuk (*deteriorates*) atau berkembang (*improves*) dalam waktu. Jika $\beta > 1$, berarti fungsi intensitas $u(t)$ meningkat sehingga kegagalan cenderung terjadi semakin sering. Jika $\beta < 1$, berarti fungsi intensitas $u(t)$ menurun sehingga sistem berkembang. Dan jika $\beta = 1$, power law mereduksi menjadi *homogeneous poisson process* yang sederhana dimana nilai fungsi intensitas menjadi sama dengan nilai parameter skala λ . Untuk lebih jelasnya mengenai gambaran fungsi intensitas $u(t)$ dapat dilihat melalui gambar *bathub curve* di bawah ini.

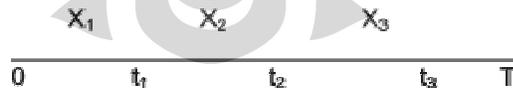


Gambar 2.8 Bathub Curve

(Sumber: NIST U.S. Commerce Department's Technology Administration. 2006)

Jika laju kegagalan itu sedang meningkat, ini berarti menandakan komponen *wearout*. Jika laju kegagalan itu sedang mengurangi, ini berarti menandakan kematian bayi. Jika laju kegagalan itu adalah konstan, lalu kegagalan-kegagalan komponen akan mengikuti satu sebaran eksponensial maka dapat disebut *homogeneous poisson process*. Untuk sebaran weibull, laju kegagalan itu sedang meningkatkan $\beta > 1$, mengurangi $\beta < 1$, dan konstan untuk $\beta = 1$.

Di dalam ilustrasi di bawah, umur komponen adalah X_j dan t_j adalah sistem waktu kepada kegagalan j -th.



Gambar 2.9 Umur dan Waktu kegagalan

Masing-masing umur komponen X_j di dalam soket itu diatur oleh sebaran yang sama $F(x)$.

Umumnya suatu sebaran seperti sebaran weibull, tidak bisa digunakan dalam *repairable system*. Suatu sebaran seperti weibull merupakan gambaran seumur hidup. Peristiwa hanya dihubungkan dengan suatu sebaran. Sebaran $F(x)$ adalah kemungkinan yang kehidupan komponen di dalam soket itu adalah kurang dari x . Di dalam ilustrasi di atas, X_1 adalah kehidupan komponen yang pertama di dalam soket. $F(x)$ adalah kemungkinan yang komponen yang pertama di dalam soket gagal pada waktunya x . Ketika komponen yang pertama gagal, itu digantikan di dalam soket dengan suatu seperti komponen. Kemungkinan yang kehidupan komponen yang kedua adalah kurang dari x diberi oleh fungsi distribusi yang sama, $F(x)$. Untuk sebaran weibull:

$$F(x) = 1 - e^{-\lambda x^\beta} \quad (2.47)$$

Suatu sebaran adalah juga ditandai oleh fungsi kerapatannya:

$$f(x) = \frac{d}{dx} F(x) \quad (2.48)$$

Fungsi kerapatan untuk sebaran weibull itu adalah:

$$f(x) = \lambda \beta x^{\beta-1} e^{-\lambda x^\beta} \quad (2.49)$$

Sebagai tambahan, satu sifat reliabilitas yang penting suatu fungsi distribusi adalah laju kegagalan yang diberi oleh:

$$r(x) = \frac{f(x)}{1 - F(x)} \quad (2.50)$$

Interpretasi laju kegagalan adalah karena untuk suatu interval yang kecil dari waktu x , $r(x)$ adalah kemungkinan bahwa suatu komponen di dalam soket itu akan kegagalan antara waktu x dan waktu $x + tx$, selama komponen tidak yang digagalkan pada waktu x .

Untuk sebaran weibull, laju kegagalan itu diberi oleh:

$$r(x) = \lambda \beta x^{\beta-1} \quad (2.51)$$

Untuk banyak sistem di suatu lingkungan dunia nyata, suatu reparasi hanyalah cukup untuk mendapat sistem operasional kembali. Di bawah reparasi minimal, kita mengasumsikan kita mempunyai suatu sistem kompleks dengan banyak modus kegagalan dan keandalan sistem setelah suatu reparasi adalah sama

karena ia tepat sebelum kegagalan. Dalam hal ini urutan dari kegagalan di tingkatan sistem mengikuti suatu *nonhomogenous Proses Poisson (NHPP)*.

Di bawah *NHPP*, kegagalan yang pertama diatur oleh suatu sebaran $F(x)$ dengan laju kegagalan $r(x)$. Masing-masing yang berhasil menggantikan kegagalan diatur oleh fungsi intensitas $u(t)$ dari proses. Nilai $u(t) = r(t)$, di mana $r(t)$ adalah laju kegagalan untuk fungsi distribusi kegagalan sistem yang pertama. Jika kegagalan sistem yang pertama mengikuti sebaran weibull, laju kegagalan itu adalah:

$$r(t) = \lambda \beta t^{\beta-1} \quad (2.52)$$

Di bawah reparasi minimal, fungsi intensitas sistem adalah:

$$u(t) = \lambda \beta t^{\beta-1} \quad (2.53)$$

Ini adalah model Power Law. Itu dapat dipandang sebagai satu perluasan sebaran weibull. Sebaran weibull menjadi kegagalan sistem yang pertama dan model Power Law berhasil menggantikan kegagalan sistem.

Jika sistem mempunyai suatu intensitas kegagalan yang tetap $u(t) = \lambda$, lalu interval antara kegagalan-kegagalan sistem mengikuti satu sebaran eksponensial dengan laju kegagalan λ . Jika sistem mengoperasikan waktu T , lalu nomor yang acak dari kegagalan-kegagalan $N(T)$ di atas 0 kepada T diberi oleh Sebaran Poisson dengan nilai tengah λT . Yang kemungkinan $N(T) = n$ diberi oleh kemungkinan Poisson:

$$\frac{(\lambda T)^n e^{-\lambda T}}{n!}, n = 0, 1, 2, \dots \quad (2.54)$$

Ini dikenal sebagai suatu proses poisson yang homogen karena tidak ada perubahan di dalam fungsi intensitas. Ini adalah suatu kasus yang khusus dari model Power Law untuk $\beta = 1$. Model Power Law adalah suatu penyamarataan Proses Poisson yang homogen dan mempertimbangkan perubahan di dalam fungsi intensitas ketika sistem dapat diperbaiki. Karena model Power Law, intensitas kegagalan sedang meningkatkan $\beta > 1$ (*wearout*), mengurangi $\beta < 1$ (*moralitas bayi*) dan konstan untuk $\beta = 1$ (*masa penggunaan*).

Untuk menunjuk ciri-ciri keandalan dari sistem kompleks yang dapat diperbaiki, suatu proses sering digunakan sebagai ganti suatu sebaran. Model

proses paling populer adalah model Power Law. Model ini adalah populer untuk beberapa pertimbangan. Pertama adalah karena itu mempunyai suatu reparasi sangat minimal. Ini adalah situasi ketika reparasi dari suatu sistem yang digagalkan hanyalah cukup untuk mendapat sistem operasional lagi kembali. Kedua, jika waktu kegagalan yang pertama mengikuti sebaran weibull, lalu masing-masing berhasil menggantikan kegagalan diatur oleh power law membentuk kasus dari reparasi minimal. Dari pandangan ini, model Power Law adalah satu perluasan sebaran weibull¹².

Dengan kata lain, sebaran weibull menunjuk kegagalan yang sangat awal dan model Power Law menunjuk masing-masing kegagalan untuk suatu sistem yang dapat diperbaiki. Alasan lain untuk kepopuleran model power law adalah karena model ini menyamaratakan proses poisson berdasar pada sebaran eksponensial. Sedangkan dari segi manajemen, model power law secara umum mudah digunakan dan dipahami, yang mendorongnya untuk menyediakan hasil-hasil bermanfaat, serta praktis untuk banyak penerapan dunia nyata.

Power law model diterapkan pada data untuk sistem ganda yang pertama diperkenalkan oleh Crow (1974). Perkiraan dan prosedur-prosedur statistik lain untuk model ini disampaikan dalam Crow (1974), (1990), (1993), (2003). Lihat juga Ascher dan Feingold (1984) dan IEC International Standard 61710 "Power Law model dengan *Goodness-of-fit* dan metode-metode perkiraan" untuk informasi tambahan tentang model Power Law.

Penaksiran parameter-parameter λ dan β untuk fungsi intensitas kegagalan Power Law berdasar pada suatu sampel acak dari armada. Di dalam situasi yang umum, kita mempunyai sistem K di dalam sampel acak dan penganjakan waktu adalah S_q , akhiran waktu adalah T_q dan X_{iq} adalah kegagalan i-th waktu berurutan untuk sistem q-th. Ada suatu total dari kegagalan-kegagalan N_q untuk sistem q-th. Kemungkinan maksimum umum menaksir λ dan β adalah nilai-nilai bahwa mencukupi persamaan 1 dan 2 di bawah, di mana \ln adalah log likelihood.

¹² Larry H. Crow. (2008). *Practical Methods for Analyzing the Reliability of Repairable Systems*. Maret 10, 2008. Reliability HotWire Magazine, issue 64. <http://www.reliasoft.com/newsletter/v5i1/repairable.htm>

$$\hat{\lambda} = \frac{\sum_{q=1}^K N_q}{\sum_{q=1}^K (T_q^{\hat{\beta}} - S_q^{\hat{\beta}})} \quad (2.55)$$

$$\hat{\beta} = \frac{\sum_{q=1}^K N_q}{\lambda \sum_{q=1}^K [T_q^{\hat{\beta}} L_n(T_q) - S_q^{\hat{\beta}} L_n(S_q)] - \sum_{q=1}^K \sum_{i=1}^{N_q} L_n(X_{iq})} \quad (2.56)$$

Jika waktu awal semuanya adalah kosong dan waktu akhir semuanya adalah sama dengan T, lalu persamaan-persamaan ini menyederhanakan pada Persamaan 3 dan 4 di bawah.

$$\hat{\lambda} = \frac{\sum_{q=1}^K N_q}{K T^{\hat{\beta}}} \quad (2.57)$$

$$\hat{\beta} = \frac{\sum_{q=1}^K N_q}{\sum_{q=1}^K \sum_{i=1}^{N_q} L_n\left(\frac{T}{X_{iq}}\right)} \quad (2.58)$$

2.3.3.6. Pengujian Statistik *Cramér-von mises*

Terdapat beberapa prosedur pengujian distribusi, diantaranya adalah metode kebaikan suai khi-kuadrat (*Chi Square Goodness of Fit*), uji *Kolmogorov smirnov*, metode grafik (*PP plot* atau *QQ plot*), *Anderson darling test*, *Log ratio transformation*, *Cramér-von mises* untuk uji distribusi data. Uji ini dipakai untuk menguji apakah data terdistribusi sesuai dengan model yang digunakan.

Sesuai dengan asumsi awal yang kita pakai adalah model power law maka uji yang paling cocok dengan model ini adalah *Cramér-von mises*.

$$C_R^2 = 1/12(n-1) + \sum_{i=1}^{n-1} \{ \check{R} - [2i-1] / [2(n-1)] \}^2 \quad (2.59)$$

dimana:

- *Ratio-power transformation* (\check{R})

$$\check{R} = (t_i/t_n)^{\beta} \quad (2.60)$$

- *Unbiased estimator* (β)

$$\beta = (n-2) / \sum_{i=1}^{n-1} \ln(tn/t_i) \quad (2.61)$$

- t_i : waktu gagal pada i
- t_n : waktu terakhir gagal (*failure truncated*)

Jika nilai *critical value* yang diperoleh dalam hasil perhitungan lebih kecil dari tabel maka model sesuai. Berikut adalah prosedur *Cramér-von mises* untuk menguji apakah data sesuai dengan model power law.

- Hipotesis nol
 H_0 : Model power law sesuai
- Menghitung nilai *critical value* (C^2_R) berdasarkan persamaan (2.59).
- Memperoleh nilai *critical value* (C^2_R) berdasarkan tabel
- Jika nilai C^2_R manual (berdasarkan perhitungan) lebih kecil dari nilai C^2_R tabel maka menerima H_0 , yang artinya model power law sesuai.
- Jika nilai C^2_R manual (berdasarkan perhitungan) lebih besar dari nilai C^2_R tabel maka menolak H_0 , yang artinya model tidak sesuai maka perlu memakai model lain yang lebih sesuai.

2.4. Waktu *Optimum Overhaul*

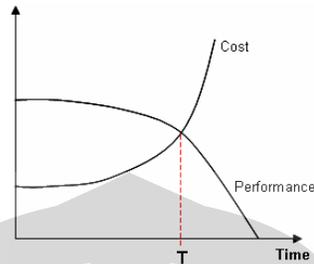
Overhaul adalah proses pembongkaran mesin dimana di dalamnya dilakukan aktivitas pembersihan, perbaikan, atau bahkan penggantian beberapa komponen dengan tujuan untuk memperpanjang *lifetime* dari *engine* tersebut. Dalam beberapa literatur disebutkan, sebuah *engine* yang sudah di *overhaul* dapat memiliki *lifetime* 2/3 hingga 3/4 *lifetime engine* baru (sebelum *overhaul*)¹³.

Sangat sulit untuk menentukan kapan suatu *engine* harus di *overhaul*. Hingga saat ini belum ada standar atau metode yang khusus digunakan untuk menentukan kapan suatu *engine* di *overhaul*. Metode praktis yang digunakan saat ini adalah berpatokan terhadap *lifetime (hourmeter) engine* yang ditetapkan oleh *manufacturer (handbook)* dan perkiraan jumlah bahan bakar yang telah terpakai.

Secara sederhana dapat dikatakan saat *optimum overhaul* adalah waktu dimana terjadi titik optimum baik dari segi *cost* maupun *performance*. Kita ketahui bahwa *engine* adalah sebuah sistem dinamis yang mengalami keausan

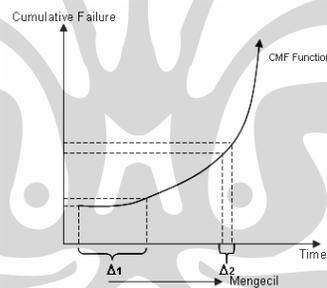
¹³ Larrie York, *How Long will a Marine Diesel Engine last?*, <http://www.frontierpower.com>

sejalan dengan waktu. Keausan tersebut berdampak terhadap penurunan *performance* dan peningkatan *cost*.



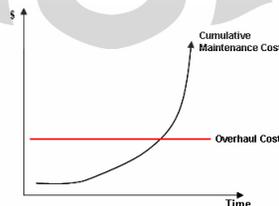
Gambar 2.10 Grafik *Cost* dan *Performance*

Permasalahan di atas dapat disederhanakan dengan memodelkan hubungan *performance* terhadap *cost*. Jika peningkatan *cost* dan penurunan *performance* dapat dimodelkan terhadap waktu maka titik optimum *overhaul* adalah titik dimana *average system cost* (*total system cost* dibagi dengan *operating time*) minimum.

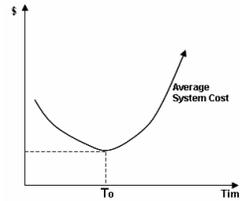


Gambar 2.11 *Cumulative Mean Function*

Menunjukkan *time between failure* yang semakin kecil akibat meningkatnya intensitas *failure* pengaruh keausan pada sistem *engine*.



Gambar 2.12 *Cumulative Maintenance Cost* dan *Overhaul Cost*



Gambar 2.13 *Average System Cost*

Melalui pembuktian matematik, Crow (2006)¹⁴ merumuskan bahwa titik optimum tersebut akan terjadi pada saat *instantaneous maintenance cost* sama dengan *average system cost*.

Misalkan C_1 adalah rata-rata *unscheduled maintenance cost*, C_2 adalah *overhaul cost*, dan C_3 adalah rata-rata *scheduled maintenance cost*. Misalkan $N(T)$ adalah jumlah *failure* pada rentang waktu $[0, T]$.

Kita menggambarkan satu penerapan model Power Law untuk mengurangi memberi beban kepada memelihara suatu armada dari sistem. Satu pertimbangan di dalam mengurangi memberi beban kepada memelihara suatu armada dari sistem ketika $\beta > 1$ untuk menetapkan satu kebijakan perbaikan menyeluruh bahwa akan memperkecil masa hidup biaya sistem. Dibiarkan biaya reparasi rerata adalah C_1 dan biaya perbaikan menyeluruh adalah C_2 . Jika sistem itu diperiksa secara seksama pada waktu T , lalu daur hidup berbiaya per satuan waktu operasi adalah yang diberi oleh:

$$\text{Cost / Unit Time} = \frac{C_2 + C_1 \lambda T^\beta}{T} \quad (2.62)$$

Apa yang merupakan perbaikan menyeluruh waktu bahwa akan memperkecil siklus masa biaya hidup. Solusi untuk model Power Law dengan parameter-parameter λ , β dan rata-rata reparasi berbiaya C_1 dan perbaikan menyeluruh berbiaya C_2 adalah optimum memeriksa secara seksama waktu T_0 yang diberi oleh:

$$T_0 = \left[\frac{C_2}{\lambda(\beta - 1)C_1} \right]^{1/\beta} \quad (2.63)$$

Nilai T_0 disebut “hidup yang hemat” dari satuan dan adalah waktu operasi ketika biaya rata-rata operasi per satuan waktu adalah yang minimum.

¹⁴ Larry H. Crow. (2008). *Practical Methods for Analyzing the Reliability of Repairable Systems*. Maret 10, 2008. Reliability HotWire Magazine, issue 64. <http://www.reliasoft.com/newsletter/v5i1/repairable.htm>

3. PENGUMPULAN DATA

3.1. Profil Perusahaan

3.1.1. Sejarah Singkat

PAMA adalah perusahaan yang bergerak dalam bidang kontraktor tambang batubara yang didirikan pada tahun 1993. PAMA merupakan anak perusahaan milik PT United Tractors sepenuhnya dengan saham mencapai 100 persen. Cikal bakal PAMA dimulai sejak tahun 1974 dalam bentuk departemen *Rental United Tractor*. Sedangkan pemilik saham utama dari PT United Tractors adalah PT Astra International yang merupakan salah satu perusahaan terbesar dan paling terkemuka di Indonesia. PAMA memiliki kontribusi terbesar kedua dalam pendapatan Astra International. Sebagai produsen kendaraan konstruksi berat dan distributor utama perlengkapan konstruksi berat bagi PAMA adalah Komatsu di Indonesia.

Sebagai perusahaan PAMA memiliki produk dan jasa yang ditawarkan seperti mining *service contractor*, *plant hire*, dan *construction services*. *Customer* dari PAMA sendiri merupakan perusahaan tambang batubara juga. *Customer* tersebut antara lain PT Adaro Indonesia, PT Bhumi Rantau Energi, PT Jembayan Muarabara, PT Arutmin Indonesia, PT Kideco Jaya Agung, PT Tambang Batubara Bukit Asam, PT Dasa Eka Jasatama, PT Indomico Mandiri, PT Kaltim Prima Coal, dan PT Tanjung Alam Jaya. Area penambangan yang dikerjakan oleh PAMA ini tersebar di Kalimantan Timur, Kalimantan Selatan, dan Palembang.

3.1.2. Nilai-Nilai Perusahaan

Sebagai usaha menjalankan perusahaannya, PAMA memiliki visi dan misi sebagai berikut :

1. Visi

Menjadi kontraktor terkemuka di dunia dengan produktivitas, kemampuan *engineering*, pengelolaan keselamatan kerja dan lingkungan hidup yang terbaik.

2. Misi

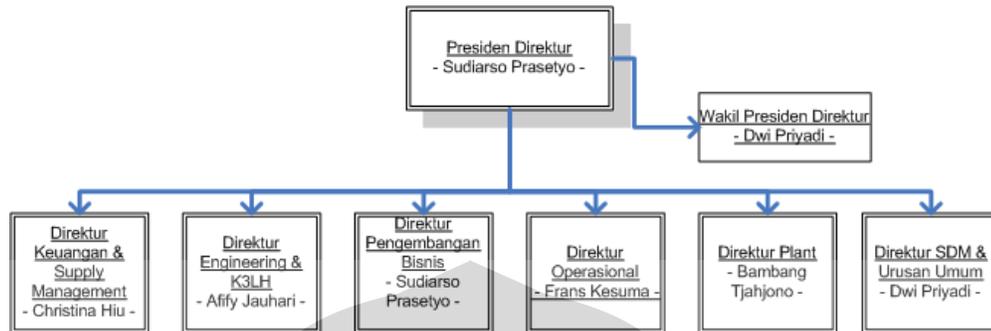
- Memberikan jasa operasi dengan alat-alat berat dalam bidang pertambangan terbuka dan pemindahan tanah yang memungkinkan pelanggan mendapatkan keuntungan terbaik di tingkat dunia.
- Memberikan kesempatan kepada karyawan mengembangkan kompetensinya untuk mencapai tujuan hidupnya.
- Memberikan MVA dan EVA yang terbaik kepada pemegang saham.
- Berupaya secara terus-menerus menguasai teknologi dan kemampuan rekayasa yang berwawasan lingkungan serta keselamatan manusia untuk kemajuan bangsa dan negara.

Sebagai pengembangan misi utama PAMA memiliki misi tambahan dalam keselamatan kerja, kesehatan pekerja, dan misi lingkungan. Selain itu terdapat falsafah perusahaan, yaitu: bermanfaat bagi bangsa dan negara *Business Development & Engineering*, pelayanan yang terbaik bagi pelanggan, saling menghargai dan membina kejasama, dan berusaha mencapai yang terbaik. Dan sebagai kebijakan mutu maka PAMA bertekad untuk menyediakan jasa kontraktor pertambangan yang dapat diandalkan dengan tingkat kepuasan yang tinggi kepada *stakeholder*, melalui :

- Fokus pada pengembangan kompetensi;
- Adanya lingkungan kerja yang sehat dan keselamatan kerja yang tinggi;
- Implementasi sistem manajemen yang berstandar internasional;
- Teknologi baru yang sesuai dengan optimalisasi kinerja keuangan perusahaan;
- Hubungan bisnis yang bernilai tambah tinggi.

Sebagai pemenang sertifikat ISO9001-2000 dan ISO14001, PAMA melakukan operasi dan perawatan sesuai standar yang direkomendasikan oleh pabrik pembuatnya.

3.1.3. Struktur Organisasi



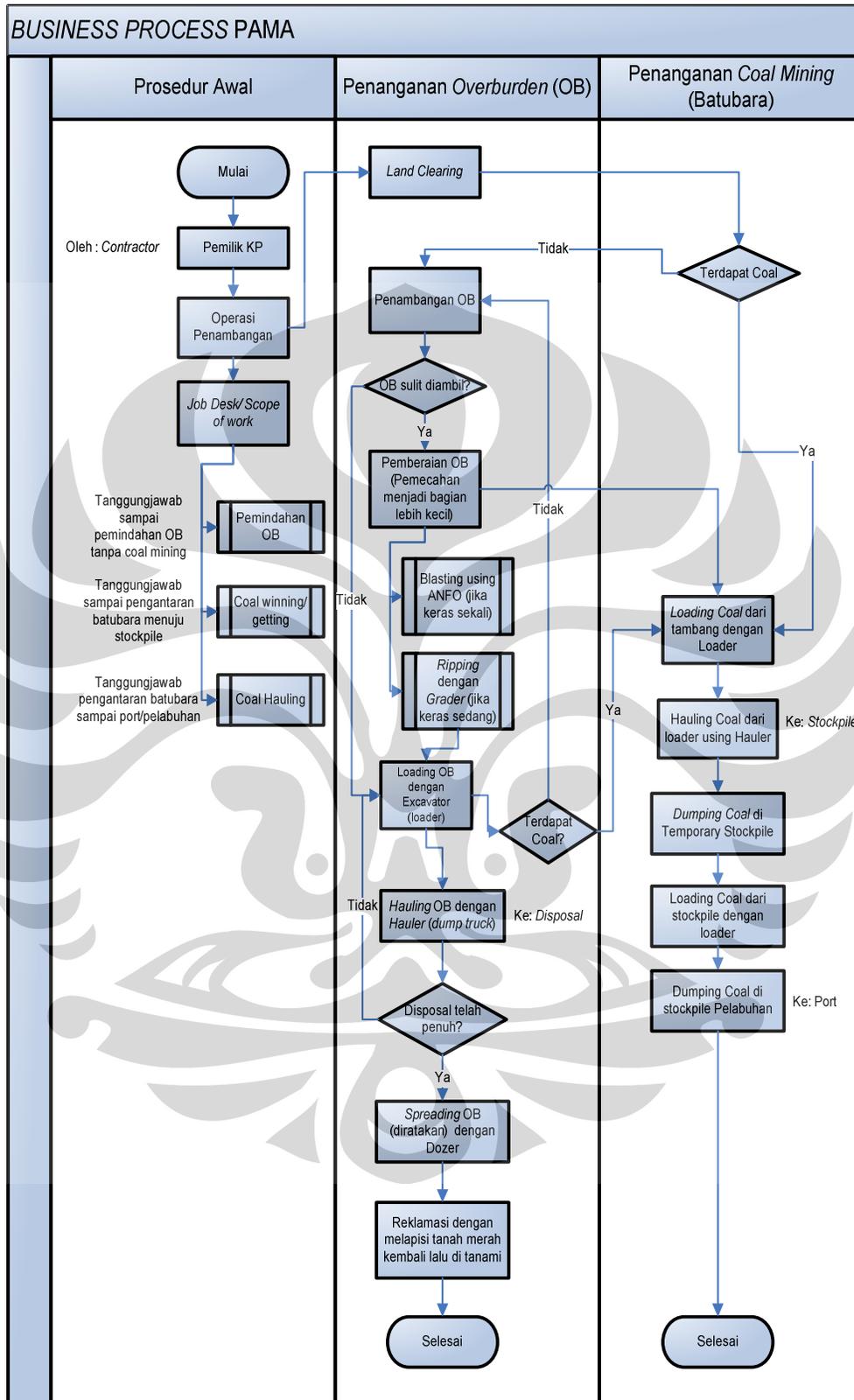
Gambar 3.1 Struktur Organisasi PAMA

3.1.4. Proses Bisnis

Secara umum proses bisnis yang dilakukan PAMA memiliki gambaran seperti dalam gambar di bawah ini. Ruang lingkup kerja dari PAMA memiliki 3 lingkup tergantung dari permintaan *customer*.

Di dalam gambar terdapat istilah mengenai dua tempat paling umum dalam penambangan yaitu *stockpile* dan *disposal*. *Stockpile* merupakan tempat penampungan batubara yang bersifat sementara sebelum menuju pelabuhan. Sedangkan *disposal* adalah tempat penampungan sementara bagi *overburden (OB)*. *Overburden* adalah segala kandungan mineral yang terdapat dalam hasil tambang kecuali batubara. Setelah *disposal* penuh oleh *overburden* yang sudah memenuhi kapasitas maka tumpukan *OB* yang menyerupai bukit diratakan lalu di reklamasi lagi dengan tanaman. Untuk penanganan batubara sendiri dilakukan penyiraman dengan air untuk menjaga suhu batubara agar tidak mudah terbakar.

Dalam pengangkatan dan pengangkutan batubara sendiri memerlukan dua alat utama yaitu *loader* alat untuk mengambil dan *dumptruck (hauler)* alat untuk mengangkut. Dalam penelitian ini yang diteliti adalah *dumptruck* dengan jenis HD-7855 yang berada dalam distrik Indomico.



Gambar 3.2 Business Process PAMA

3.2. Pengumpulan Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data sekunder yang diperoleh dari data-data perusahaan PAMA. Data yang digunakan merupakan data *WO (work order)* dari tahun 2004 sampai 2008. Data *WO* merupakan data historis alat dan secara garis besar terbagi dalam dua kategori, yaitu:

1. Data *schedule maintenance* berisi segala kegiatan *maintenance* yang sudah terjadwal seperti 250 *hour*, 500 *hour*, 1000 *hour*, 2000 *hour*, dan *midlife overhaul*.
2. Data *unschedule maintenance* berisi segala kegiatan *maintenance* yang merupakan tindakan *maintenance* di luar penjadwalan seperti kegiatan perbaikan, pergantian komponen, pembersihan, dan lain-lain.

3.2.1. Perumusan Data

Salah satu pertimbangan dalam mengurangi biaya untuk pemeliharaan sistem *repairable* adalah dengan menentukan kebijakan *overhaul* dimana akan memperkecil total biaya sistem. Bagaimanapun, kebijakan *overhaul* hanya dapat diterapkan jika $\beta > 1$. Tidak akan berarti untuk mengimplementasikan kebijakan *overhaul* jika $\beta < 1$ selama *wearout* (fase penurunan) tidak terjadi. Jika terdapat asumsi dimana ada nilai termurah untuk *overhaul* sistem dibanding harus melanjutkan perbaikan, maka kita perlu mengetahui kapan waktu *overhaul* yang akan memperkecil total biaya dengan mempertimbangkan biaya perbaikan dan biaya *overhaul*.

Dalam perhitungan titik *optimum overhaul* terdapat beberapa data *input* seperti C_1 , C_2 , C_3 , λ , dan β . Dengan C_1 sebagai rata-rata biaya perbaikan (*unscheduled*), C_2 sebagai biaya *overhaul*, dan C_3 sebagai biaya rata-rata biaya *scheduled maintenance*. *Scheduled maintenance* dilaksanakan setiap periode tertentu dalam interval waktu S yang telah ditentukan. Di PAMA sendiri *scheduled maintenance* dilaksanakan setiap 250 *hour*, 500 *hour*, 1000 *hour*, 2000 *hour*, dan *midlife overhaul*. Sebagai tambahan, N_1 merupakan jumlah kegagalan dalam $[0, t]$ dan N_2 adalah jumlah pergantian dalam $[0, t]$. Ketika $\beta > 1$, rata-rata biaya adalah paling kecil ketika sistem di *overhaul* dalam waktu T_0 , seperti saat

biaya *instantaneous maintenance* sama dengan rata-rata sistem biaya. Rumus titik *optimum overhaul* dapat dijelaskan melalui penurunan rumus dibawah ini:

Total sistem biaya saat *overhaul* atau penggantian adalah:

$$TSC(T) = C_1 E(N(T)) + C_2 + C_3 \frac{T}{S} \quad (3.1)$$

Dengan demikian rata-rata biaya menjadi:

$$C(T) = \frac{C_1 E(N(T)) + C_2 + C_3 \frac{T}{S}}{T} \quad (3.2)$$

Biaya *instantaneous maintenance* pada waktu T adalah sama dengan:

$$IMC(T) = C_1 \lambda \beta T^{\beta-1} + \frac{C_3}{S} \quad (3.3)$$

Menurut persamaan, maka waktu *optimum overhaul* T_0 :

$$\begin{aligned} C_1 \lambda \beta T_0^{\beta-1} + \frac{C_3}{S} &= \frac{C_1 E(N(T)) + C_2 + C_3 \frac{T}{S}}{T} \\ &= \frac{C_1 \lambda T_0^\beta + C_2 + C_3 \frac{T_0}{S}}{T_0} \end{aligned} \quad (3.4)$$

Oleh karena itu:

$$T_0 = \left[\frac{C_2}{\lambda(\beta-1)C_1} \right]^{1/\beta} \quad (3.5)$$

Ketika tidak ada *scheduled maintenance*, maka persamaan menjadi:

$$C_1 \lambda \beta T_0^{\beta-1} = \frac{C_1 \lambda T_0^\beta + C_2}{T_0} \quad (3.6)$$

Waktu *optimum overhaul*, T_0 yang dihasilkan dengan persamaan di atas adalah sama dengan persamaan (2.63). Ini berarti biaya *scheduled maintenance* tidak berpengaruh terhadap persamaan waktu *optimum overhaul* T_0 . Oleh karena itu dalam penelitian ini data yang dipakai sebagai model adalah data *unschedule maintenance*.

3.2.2. Metodologi Pengolahan Data WO

Dalam hal ini metodologi yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Memilih data yang diperlukan berdasarkan:
 - Memilih kolom *district* sesuai batas penelitian, yaitu Indomico.

- Memilih kolom *EGI* untuk jenis *dumptruck* yang diteliti yaitu tipe HD7855.
 - Memilih kolom *componen description* pada “*engine*”.
 - Mengambil 20 *dumptruck* sebagai obyek penelitian.
2. Memilih data yang diperlukan, yaitu:
- Data waktu kegagalan: data ini adalah sumber data bagi model reliabilitas. Data ini memiliki satuan dalam *hourmeter* (*HMR*). Data ini menggambarkan usia *engine* saat ini selama waktu pemakaian. Jadi jika *dumptruck* tidak sedang bekerja maka *hourmeter* pun tidak akan bertambah. Jadi pertambahan usia sesuai dengan lamanya *engine* itu bekerja atau digunakan. Berikut ini adalah contoh data *hourmeter* (*HMR*) berdasarkan data *WO*-Desember 2007. Disini tercatat bahwa umur *engine* telah mencapai 11657 jam pada bulan Desember 2007.

Tabel 3.1 Data Hour Meter

District	EQUIP. No	EGI	WO. DESCRIPTION	COMP. DESCRIPT	FAILURE PART	ACTION	HMR.
INDO	DT3101	HD7855	Tangki feul leak	ENGINE	561-04-6A113	REPAIR	11657

- Data Biaya Material

Biaya material memiliki satuan \$ (dollar). Data pada tabel di bawah ini menunjukkan tidak semua kegagalan memerlukan biaya material karena biaya ini timbul jika ada pergantian alat ataupun memerlukan bahan tambahan untuk perbaikan.

Tabel 3.2 Data Biaya Material

District	EQUIP. No	EGI	WO. DESCRIPTION	COMP. DESCRIPT	FAILURE PART	ACTION	HMR.	MATERIAL COST
INDO	DT3075	HD7855	POTENSIO ERROR 02	ENGINE	PEDAL GAS	REPLACE PARTS		0
INDO	DT3075	HD7855	WATER PUMP LEAK	ENGINE	6215-61-1403	REPLACE PARTS	13061	1750.1

- Data Biaya Operator

Biaya operator berarti biaya yang dikeluarkan untuk tenaga manusia yang terlibat dalam perbaikan. Biaya operator didapat dengan mengalikan durasi waktu yang diperlukan dalam perbaikan dengan \$/jam. Jadi jika durasi

waktunya 2 jam, maka biaya operator menjadi 2 x \$/jam. Biaya ini memiliki satuan \$.

- Data Biaya *Overhaul*

Biaya *overhaul* adalah biaya yang dikeluarkan ketika *engine* di *overhaul*. Biaya ini sama untuk semua *engine* yaitu \$55000. Biaya ini sudah memiliki standar dari pihak *supplier*.

3. Merangkum data dari tahun 2004 sampai tahun 2008.
4. Menghitung biaya operator dengan mengalikan *duration* (lamanya waktu dalam jam) dengan biaya operator (\$)/jam. Biaya operator = *duration* x \$4 x 2 (jumlah operator setiap *dumptruck* berjumlah 2 orang).
5. Menghitung biaya total *unscheduled maintenance* dengan menjumlahkan seluruh biaya material ditambahkan dengan seluruh biaya operator.
6. Menghitung biaya rata-rata *unscheduled maintenance* dengan membagi biaya total dengan jumlah kegagalan yang terjadi.

Hasil contoh pengolahan data *WO* dapat terlihat dalam tabel di bawah ini.

Tabel 3.3 Contoh Hasil Pengolahan Data *WO*

Nb	EQUIP. Nb	EGI	WO DESCRIPTION	FAILURE PART	ACTION	HMR	DURATION	MATERIAL COST	Duration Cost	Waktu	
1	DT3101	HD7865	EL: REPAIR ENGINE		REPLACE PARTS	357	0.00	2732.46		0 febr06	
2	DT3101	HD7865	CLUMP MUFFLER BROKEN	EXHAUST	REPLACE PARTS	346	7.75	1283.92		31	
3	DT3101	HD7865	RIP ENGINE LOW POWER	COUPLING RIP	REPAIR	2564	5.00	119.04		20 Jun06	
4	DT3101	HD7865	RIP LEAK	BOLT	TIGHTEN	3560	0.50	0		2 Apr06	
5	DT3101	HD7865	WATER PUMP EL: REPAIR ENGINE	ENGINE	REPLACE PARTS	3579	4.00	6.9		16	
6	DT3101	HD7865	TURBO CLAMP LOOSE	CLAMP	REPLACE PARTS	7516	1.00	94.4		4 Apr07	
7	DT3101	HD7865	COOLANT LEVEL ERROR	SC: 34447	ADD OIL	8089	0.33	481.63		1.32 May07	
8	DT3101	HD7865	WATER COOLANT ON + FOG LAMP SWITCH ABN	AIR RADIATOR	ADD OIL	9363	0.67	481.63		2.68 Jul07	
9	DT3101	HD7865	EL: CAP RADIATOR BROKEN	BACK LOG	REPLACE PARTS	9925	4.00	188.63		16 sept07	
10	DT3101	HD7865	Tangki fuel leak	561-04-6A113	REPAIR	11657	11.82	7471.7		47.28 Des07	
								Jumlah	12860.4	140.28	
								Total cost	13000.68		
								Avg Cost	1300.068		

Pada contoh di atas data yang diambil adalah *dumptruck* dengan nomor DT 3101. Perhitungan biaya rata-rata *maintenance* berdasarkan kolom *material cost* dengan *duration cost* (*operator cost*). Dapat dilihat parameter C1 sebagai input mencari waktu *optimum overhaul* adalah *avg.cost* yang bernilai \$ 1300.088. Hasil pengolahan data ini juga menghasilkan kolom *hmr* (*hourmeter*) yang akan dijadikan input dalam membuat rumusan model reliabilitas. *Hourmeter* ini menunjukkan waktu kegagalan setiap *dumptruck* berdasarkan *unscheduled maintenance*.

3.3. Perumusan Model

Model yang digunakan dalam penelitian ini adalah model *stochastic point process*. Model ini dipilih karena sistem yang diteliti merupakan *repairable systems*. Pada *repairable system* data kegagalan sistem tidak mengikuti pola *s.i.i.d* (*statistically independent and identically distributed*). Sedangkan asumsi dalam model *stochastic point process* adalah tidak mengikuti pola *s.i.i.d*. Model *stochastic point process* yang terpilih adalah *NHPP* dengan *power law model* dan *GRP* (*General Renewal Process*). Jika kita berasumsi bahwa reparasi secara parsial memperbaharui sistem dan itu bukanlah *as-bad-as-old* setelah reparasi, lalu model *NHPP* tidak menjadi model yang paling sesuai untuk analisis maka *General Renewal Process* (*GRP*) bisa digunakan sebagai gantinya¹. Model ini telah dibahas di suatu artikel *Reliability Edge* (Volume 6, <http://www.ReliaSoft.com/newsletter/v6i1/restoration.htm>).

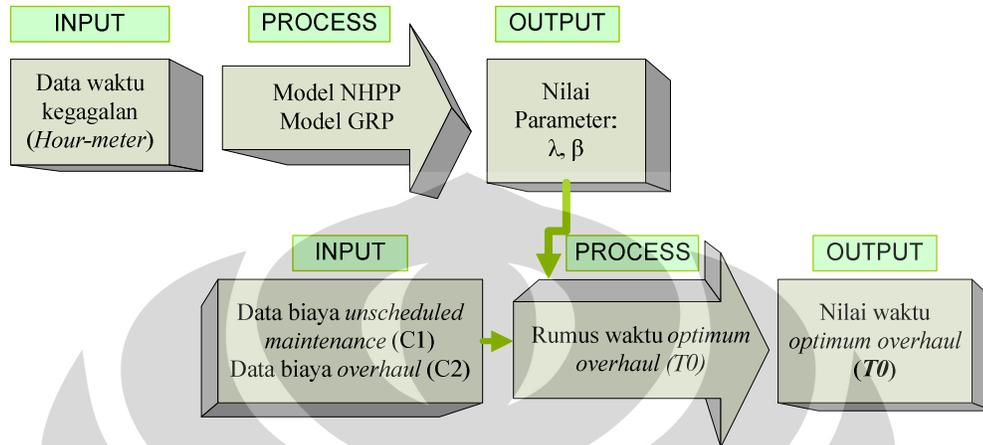
Sistem yang ditinjau adalah sistem *engine dumptruck*. *Dumptruck* merupakan alat utama dalam penambangan yang berfungsi untuk mengangkut batubara. Istilah *dumptruck* sering disebut sebagai *hauler* dan merupakan alat angkut paling banyak digunakan di PAMA. Di bawah ini terdapat contoh gambar *dumptruck* yang dipakai.



Gambar 3.3 *Dump Truck*

¹ ReliaSoft Corporation. (2008). *Avoiding a Common Mistake in the Analysis of Repairable Systems*. Maret 10, 2008. *Reliability Edge*, Volume 7, Issue 1, Tucson, AZ. <http://www.reliasoft.com/newsletter/v7i1/index.htm>

Dalam perumusan model ini maka kita dapat melihat secara garis besar bagaimana *input* dan *output* dari penelitian menurut diagram di bawah ini.



Gambar 3.4 Diagram IPO (Input-Process-Output)

3.3.1. Metodologi Pemodelan

Perhitungan data berdasarkan *failure truncated* artinya pengambilan data terakhir berdasarkan waktu kegagalan terakhir jadi bukan waktu terakhir yang diamati. Dalam melakukan model ini digunakan dua piranti lunak yaitu RGA 6 untuk model Power Law dan Weibull++ 7 untuk model GRP.

3.3.1.1. Model Power Law

Dalam membuat model Power law digunakan piranti lunak RGA 6. Piranti lunak ini memiliki kemampuan dalam menganalisa *reliability growth* dan *fielded system*, langkah-langkahnya adalah²:

1. Membuka lembaran baru pada pilihan *data type expert*, dengan memilih *fielded repairable systems*.
2. Masukkan data waktu kegagalan dalam kolom “*Time to Event*” dan mengisi *Start* dengan nilai “0” dan *End* dengan waktu terakhir sistem mengalami kegagalan.
3. Menghitung parameter dengan model Power Law.

² ReliaSoft Corporation. (2005). *Software Training Guide Reliasoft's RGA 6*. USA

4. Jika nilai parameter $\beta > 1$, maka dilanjutkan dengan menghitung *optimum overhaul time* melalui *QCP (Quick Calculation Pad)* dengan mengklik pada *Option for Calculations* yaitu pada bagian *optimum overhaul*. Pada bagian ini kita perlu menginput data biaya rata-rata *maintenance* dan biaya *overhaul* sehingga menghasilkan *output* berupa nilai *To*. Jika nilai $\beta < 1$, maka secara otomatis nilai *To* tidak muncul karena tidak ada artinya jika kita menghitung nilai *To* sementara keadaan sistem masih jauh dari keadaan “*wearout*”.

5. Pengujian Statistik *Cramér-von mises*

RGA 6 menyediakan metode *chi-squared* dan *cramér-von mises* untuk pengujian *goodness-of-fit* tergantung pada data yang diuji. Dalam hal ini data yang di uji adalah *repairable* pada *fielded systems* dan model yang tersedia adalah model Power Law sehingga uji yang dipakai adalah metode *cramér-von mises*. Dalam model ini juga terdapat *Common Beta Hypothesis (CBH)* untuk mengindikasikan apakah *multiple systems* seharusnya di kombinasikan kedalam “*equivalent*” atau “*superposition*” untuk dianalisa. Tersedia juga *laplace trend test* untuk mengindikasikan apakah reliabilitas sistem sedang *improving*, *deteriorating* atau konstan.

3.3.1.2. Model GRP

Setelah dilakukan uji statistik dengan metode *cramér-von mises* ternyata tidak semua sistem sesuai dengan model Power Law, untuk itu perlu adanya model lain yang dapat menjelaskan reliabilitas sistem. Sesuai dengan literatur, maka penelitian ini dilanjutkan dengan model GRP yang dibangun dengan model Power Law. Perbedaan dari kedua model ini adalah pada tingkat *restoration factor (RF)*. Pada model Power Law nilai $RF = 0$, artinya perbaikan tidak menyebabkan perubahan pada sistem hanya mengembalikan sistem pada kondisi operasi seperti biasa atau biasa disebut sebagai *as bad as old*. Sedangkan pada model GRP nilai *restoration factor* yaitu $0 < RF < 1$, artinya perbaikan menjadikan sistem diantara keadaan *as good as new* dan *as bad as old*.

Dalam membuat model GRP digunakan piranti lunak Weibull++ 7. Langkah-langkah dalam membuat model GRP:

1. Pada halaman pertama dari *Project Wizards*, pilih untuk membuat *project* baru dengan mengklik Next > untuk proses selanjutnya.
2. Selanjutnya klik *Project*, pilih *Specialized Folios*, lalu pilih *Parametric RDA*, untuk memilih *GRP model*.
3. Masukkan data waktu kegagalan dalam kolom “*Time Failed*” lalu ketik F pada kolom F/E pada semua baris kegagalan kecuali baris terakhir di ketik huruf E sebagai akhir.
4. Menghitung parameter dengan model *GRP* tipe I, sesuai gambar di bawah ini dengan mengklik pada main menu di kolom sebelah kanan yang terdapat simbol λ, β .
5. Menghitung parameter dengan model *GRP* tipe II, sesuai gambar di bawah ini dengan mengklik pada main menu di kolom sebelah kanan yang terdapat simbol λ, β .
6. Dalam model ini tidak terdapat uji statistik karena nilai *restoration factor* didapat dalam hasil perhitungan bukan berdasarkan asumsi awal.
7. Membandingkan semua model dengan nilai *LKV (Likelihood Value)* yang muncul sebagai hasil perhitungan. *LKV* adalah nilai yang menunjukkan bagaimana data dan model saling cocok. *LKV* merupakan parameter yang umum ada di semua model dan hanya sebagai referensi.

3.4. Perhitungan Waktu *Optimum Overhaul*

Setelah melakukan perumusan model, maka akan didapat nilai λ dan β . Setelah melakukan pengolahan data WO maka kita akan mendapat nilai C1 sebagai biaya *unscheduled maintenace* dan C2 sebagai biaya *overhaul*. Maka sesuai penurunan rumus dapat dihitung secara manual melalui rumus:

$$\hat{T}_o = \left[\frac{C_2}{\lambda(\beta - 1)C_1} \right]^{1/\beta} \quad (3.7)$$

Untuk nilai $\beta < 1$ maka nilai waktu optimum overhaul tidak dapat dihitung karena sesuai dengan rumus di atas hasil akar minus itu tidak ada. Selain itu jika dihubungkan dengan keadaan aktual jika nilai $\beta < 1$ maka sistem sedang dalam fase mortalitas bayi atau perkembangan sehingga tidak ada artinya jika kita

menghitung nilai To sementara sistem memberikan performa yang sangat baik. Maka dari itu jika $\beta < 1$ hasil perhitungan hanya muncul #NUM!.

3.5. Uji Validitas

Validasi model secara umum dibedakan menjadi validasi internal dan validasi eksternal. Validasi *internal* sering disamakan dengan verifikasi, yaitu pemeriksaan apakah model yang dibangun benar secara matematis dan konsisten. Validasi sebenarnya sering dimaksudkan sebagai validasi *eksternal*. Pada validasi *eksternal*, model dicek kesesuaiannya dengan sistem nyata. Karena hasil dari model ini adalah untuk perkiraan yang akan datang dan belum terjadi maka validasi dengan membandingkan keadaan aktual adalah tidak mungkin.

Pada penelitian ini, validasi dilakukan dengan membandingkan hasil model dengan perhitungan manual apakah sesuai atau tidak. Sebelum memvalidasi model maka pertama yang dilakukan adalah validasi data. Syarat minimal data untuk memodelkan *repairable systems* adalah berjumlah 2 kegagalan. Karena data yang didapat minimal berjumlah 3 kegagalan maka data cukup valid untuk diolah.

3.5.1. Perhitungan Manual

Perhitungan ini berdasarkan rumus dalam buku (Rigdon, 2000) dengan model Power Law dan studi kasus *failure truncated*.

Tabel 3.4 Hasil Perhitungan Manual DT 3083

i	T	Ln(Tn/Tx)	i/T	Ri=(ti/tn) ^β	(2N-1)/2(n-1)	F - G	(F-G) ²
1	2440	1.562707	0.0004	0.202193245	0.07142857	0.130765	0.017099
2	2791	1.428305	0.0007	0.231992934	0.21428571	0.017707	0.000314
3	5252	0.796096	0.0006	0.44292878	0.35714286	0.085786	0.007359
4	5314	0.78436	0.0008	0.448278154	0.5	-0.05172	0.002675
5	6558	0.574019	0.0008	0.555893488	0.64285714	-0.08696	0.007563
6	8021	0.372642	0.0007	0.689051738	0.78571429	-0.10266	0.01054
7	8226	0.347405	0.0009	0.700914504	0.92857143	-0.22766	0.051828
8	11643	0	0.0007	1	1.07142857	-0.07143	0.005102
Jumlah (Σ)		5.865536	0.0055				0.102479
N		8					
Beta (Shape)		1.363899		β 1.022924499		C2R	0.114384
eta (θ)(Scale)		2534.7					
T ^α β		351320.3					
Intensity function (λ di buku)		0.000937					
Lamda (λ)		2.28E-05					
N hitung [A(T)]		8					
Intensity function[u(t)]		0.000937					
E[N(t)]		8					

$\lambda(t) = (\beta/\theta) [(t/\theta)^{\beta-1}]$	Sama	→ POWER LAW MODEL
$u(t) = \lambda \beta t^{\beta-1}$		

Power Law adalah model *nonhomogeneous Poisson process* dengan fungsi intensitas $\lambda(t) = (\beta/\theta) \times [(t/\theta)^{(\beta-1)}]$ ³ dimana parameter $\lambda(t)$ sebenarnya memiliki notasi yang sama dengan $u(t)$ yang berarti fungsi intensitas. Untuk pengolahan data selanjutnya ditetapkan notasi fungsi intensitas adalah $u(t)$ dan λ sebagai notasi lamda. Pada model umumnya nilai $u(t) = \lambda\beta t^{\beta-1}$, dimana λ adalah notasi lamda, β adalah notasi beta, dan t adalah waktu kegagalan terakhir. Maka dapat dibuktikan bahwa:

$$\begin{aligned} \lambda(t) &= u(t) \\ (\beta/\theta) \times [(t/\theta)^{(\beta-1)}] &= \lambda\beta t^{\beta-1} \end{aligned} \quad (3.8)$$

Hal ini terbukti dari tabel di atas nilai $\lambda(t) = u(t)$, yaitu sebesar 0.000937. Perbedaannya terletak dalam langkah pengerjaannya, dimana untuk mencari nilai $\lambda(t)$ harus mencari parameter β (beta/shape) dan θ (eta/skala) sedangkan nilai $u(t)$ didapat melalui parameter β (beta/shape) dan λ (lamda). Hal ini membuktikan kalau Power Law merupakan pengembangan weibull sehingga sering disebut juga *weibull process* karena parameter yang digunakan hamper sama. Perbedaannya kalau weibull digunakan dalam sistem *nonrepairable* sedangkan Power Law untuk sistem *repairable*. Nilai β di atas adalah 1.363899, artinya sistem sedang dalam keadaan *wearout* atau *deteriorating*. Nilai parameter θ (eta/skala) adalah 2534.7 dan parameter λ (lamda) 2.28E-05.

Nilai C^2R dari hasil perhitungan adalah 0.114384. Dengan $\alpha = 0.1$, *critical value* (C^2R) pada tabel menunjukkan 0.165. Pada kasus ini tidak akan menolak H_0 (Hipotesis nul) karena C^2R yang didapat dari hasil perhitungan lebih kecil dari C^2R tabel. Sehingga model Power Law sesuai dengan sistem ini karena menerima H_0 , dimana H_0 adalah menerima model Power Law.

3.5.2. Perhitungan Hasil Software

Untuk memudahkan pengolahan data maka dalam penelitian ini menggunakan software khusus untuk *reliability analysis in repairable systems*. Dengan *software* ini hasil perhitungan dapat lebih akurat dan mengurangi

³ Steven E. Rigdon & Asit P. Basu. (2000). *Statistical Methods for the Reliability of Repairable Systems*. New York: John Wiley & Sons, Inc.

kesalahan faktor manusia dalam salah menghitung, selain itu hasilnya dapat disajikan dalam grafik yang memudahkan dan menarik untuk dibaca.

3.5.2.1. Hasil RGA 6

Analysis Summary					
Model:	Power Law			Analysis Method:	MLE
Beta:	1.3639			Test Procedure:	Fielded-Repair
Lambda:	0.000022771			Input Type:	Cumulative
				Start Time:	0
				End Time:	11643
				Failures:	8
System Summary					
System Name	Start Time	End Time	Failures	Beta	Lambda
System 1	0	11643	8	1.3639	0.000022771
Statistical Results					
	Result	Lower	Test Value	Upper	
Superposition System					
Cram'er Von Mises	Passed	-	0.1093	0.165	
Common Beta Hypothesis	Not Available	-	-	-	
System 1					
Cram'er Von Mises	Passed	-	0.0591	0.165	
Laplace Trend	No Trend	-1.6449	0.3864	1.6449	
Data					
Superposition System					
Item Number	Number At Event	Time to Event			
1	1	2440			
2	1	2791			
3	1	5252			
4	1	5314			
5	1	6558			
6	1	8021			
7	1	8226			
8	1	11643			
System 1					
Item Number	Time to Event	Comment 1			
1	2440				
2	2791				
3	5252				
4	5314				
5	6558				
6	8021				
7	8226				
8	11643				

Gambar 3.5 Hasil RGA 6

Dalam gambar di atas maka kita dapat langsung mengetahui nilai parameter dalam model Power Law. Dengan melihat hasil RGA 6 maka nilai β di atas adalah 1.3639, artinya sistem sedang dalam keadaan *wearout* atau *deteriorating* sedangkan parameter λ (lamda) 2.2771 E-05. Jika dibandingkan dengan perhitungan manual sebelumnya maka nilai semua parameter sama. Pada gambar dijelaskan bahwa sistem mengalami passed pada uji statistik dengan *Cramér-von mises*, ini berarti sistem ini sesuai dengan model Power Law. Hal ini membuktikan kalau model ini valid digunakan.

3.5.2.2. Hasil Weibull ++7

Jika ternyata hasil pengolahan data menyatakan sistem “*failed*” atau model Power Law tidak sesuai maka kita menggunakan model GRP yang memiliki keterkaitan dan persamaan dimana Power Law memiliki $q = 1$ dan GRP memiliki $0 < q < 1$. Sehingga hasil parameter dari masing-masing model memiliki persamaan jika dalam model GRP kita memakai 2-parameter dengan asumsi $q=1$. Hal ini dapat kita lihat pada gambar di bawah ini.

Date:	4/24/2008
User:	Vita
Company:	Industrial Eng9ineering
GRP	2-Parameter
FI Function	Power Law
Beta	1.363899331
Lambda	2.28E-05
q	1
LK Value	-65.91583347

Gambar 3.6 Hasil Weibull ++7

Pada gambar nilai Nilai β di atas adalah 1.363899331, artinya sistem sedang dalam keadaan *wearout* sedangkan parameter λ (lamda) 2.28E-05. Dalam model GRP tidak ada *goodness of fit test* atau uji statistik karena tidak asumsi nilai q diawal tetapi parameter q dihitung dan langsung mengepas sesuai sistemnya pada GRP-3 parameter. Sedangkan pada contoh validasi ini dipakai GRP-2parameter untuk menentukan apakah model GRP memiliki keterkaitan dengan model Power Law. Sehingga model Power Law dan GRP dengan *software* ini telah tervalidasi dan dapat diaplikasikan.

4. PENGOLAHAN DATA DAN ANALISIS

Pada bab ini akan dijelaskan mengenai hasil-hasil pengolahan data beserta analisisnya. Pembahasan dalam bab ini secara garis besar dibagi dalam:

1. Pengolahan data biaya *maintenance*
2. Model reliabilitas
3. Analisis model yang dipilih
4. Analisis Waktu *Optimum Overhaul* (To)

4.1. Data Awal

Data awal didapat dengan pengolahan data historis dari setiap jenis *dump truck* yang diteliti, yaitu 20 *dump truck* dengan jenis HD785-5. Tujuan pengolahan data ini adalah untuk mendapatkan nilai parameter C1 (rata-rata biaya *maintenance* masing-masing *dump truck*) sebagai salah satu parameter dalam mencari nilai waktu *optimum overhaul* (To). Kesemuanya dimasukkan ke dalam tabel data perhitungan biaya yang di ringkas dari data WO yang merupakan data historis setiap *dump truck* (data tahun 2004 sampai dengan tahun 2008). Secara umum pengolahan data awal dilakukan melalui beberapa tahapan:

1. Perhitungan biaya rata-rata *maintenance* berdasarkan data historis *dump truck* yang menjadi parameter C1 untuk menentukan titik *optimum overhaul*.
2. Analisis statistik untuk data awal memakai:
 - a. Analisis deskriptif untuk melihat gambaran umum dari hasil-hasil perhitungan biaya *maintenance*.
 - b. Analisis regresi untuk mengetahui hubungan antara biaya *maintenance* dengan jumlah kegagalan.

Di dalam tabel perhitungan biaya terdapat 10 kolom yang merupakan hasil ringkasan data WO yang memiliki 37 kolom. Pada kolom *EQUIP* berisi nomor *dump truck* sedangkan kolom *EGI* merupakan tipe *dump truck*. Kolom *FAILURE _PART* menjelaskan bagian yang menyebabkan kegagalan *engine* sedangkan *ACTION* adalah tindakan untuk mengatasi kegagalan tersebut. *HMR* adalah data

terpenting dalam membuat model reliabilitas, merupakan data waktu kegagalan dalam satuan *hourmeter*. Kolom *DURATION* menjelaskan lamanya kegiatan yang dilakukan dalam mengatasi kegagalan yang terjadi, merupakan sumber data untuk menghitung biaya operator. Biaya operator dihitung dengan mengalikan *duration* dengan biaya (\$)/jam (standar biaya operator dalam satu jam) lalu dikali dengan jumlah operator yang dipakai. Pada penelitian ini jumlah operator dalam satu *dump truck* berjumlah dua orang. Total biaya adalah penjumlahan dari jumlah biaya material dengan jumlah biaya operator sedangkan N adalah jumlah kegagalan yang terjadi. Hasil bagi antara total biaya dengan N adalah *average maintenance cost* (biaya rata-rata) yang merupakan *input* dalam persamaan titik *optimum overhaul* (To), dilambangkan dengan C1.

4.1.1. Pengolahan Data Biaya Maintenance

Pengolahan data biaya merupakan langkah awal untuk merangkum waktu, jumlah kegagalan, dan biaya yang akan ditampilkan dalam tabel di bawah ini.

a. *Dump truck* (DT) 3049

Tabel 4.1 Data Perhitungan Biaya *DT* 3049

No	EQUIP.	EGI	WO. DESCRIPTION	FAILURE PART	ACTION	HMR.	DURATION	MATERIAL COST	OPERATOR COST
1	DT3049	HD7855	BYPASS FUEL FILTER LOOSEN	BOLT	RETIGHTEN	4429	0.33	0	2.64
2	DT3049	HD7855	FIP. LEAKS	VALVE	RETIGHTEN	4995	0.50	5.4	4
3	DT3049	HD7855	FUEL PIPING HOSE FIP LEAKS	BOLT	REPOSITION	5427	1.75	0	14
4	DT3049	HD7855	WATER COOLER LEAKS	WATER PUMP	REPLACE PARTS	6465	8.50	1370.74	68
5	DT3049	HD7855	OIL ENGINE LEAKS	O-RING	REPLACE PARTS	7090	0.75	28.77	6
6	DT3049	HD7855	ORING OIL ENGINE LEAKS	BOLT	RETIGHTEN	7768	0.58	396.2	4.64
7	DT3049	HD7855	POTENSIO ERROR 02 // CO 31	POTENSIO PEDAL	CLEAN	7940	2.00	0	16
8	DT3049	HD7855	POTENSIO ERROR 02	569-44-61310	REPLACE PARTS	8912	3.00	1711.4	24
9	DT3049	HD7855	POTENSIO ERROR 02	ACLERATOR PEDAL	REPLACE PARTS	8981	2.00	548.59	16
10	DT3049	HD7855	FUEL FILTER LEACK	FILTAKLEEN	REPLACE PARTS	9527	0.50	23.73	4
11	DT3049	HD7855	FUEL GAUGE ABNORMAL	FUEL SYSTEM	REPAIR	10791	0.83	211.28	6.64
12	DT3049	HD7855	WATER COLLANT ON	7861-92-3320	REPLACE PARTS	11076	2.00	119.4	16
13	DT3049	HD7855	POTENSIO Error 02	PEDAL GAS	REPAIR	15482	0.42	0	3.36
Jumlah								4415.51	185.28
Total Cost								4600.79	
N (Jml Gagal)								13	
Avg. Cost (C1)								353.9069231	

Jumlah biaya didapat dari penjumlahan *material cost* dan *operator cost* yaitu \$ 4600.79. Karena jumlah kegagalan 13 maka *average cost* menjadi \$ 353.5. Kegagalan yang diteliti dibatasi hanya pada *engine* karena *overhaul* hanya terjadi di *engine* dan biaya terbesar dalam sistem *dump truck* terletak dalam *maintenance engine*. Pada kolom *ACTION* dapat terlihat tindakan yang dilakukan ada 5 macam, dimana *retighten* adalah mengencangkan bagian yang kendur.

b. *Dump truck (DT) 3050***Tabel 4.2** Data Perhitungan Biaya *DT* 3050

No	EQUIP. No	EGI	WO. DESCRIPTION	FAILURE PART	ACTION	HMR	DURATION	MATERIAL COST	OPERATOR COST
1	DT3050	HD7855	FUEL ENGINE STOP DURING OPERATION	STAINER	CLEAN	158	3.08	0	24.64
2	DT3050	HD7855	SENSOR GAUGE ABNORMAL S5NE	GANGE	REPAIR	1874	3.25	0	26
3	DT3050	HD7855	FIP. LEAKING OF FIP	BALL JOINT	REPLACE PARTS	2757	1.25	146.3	10
4	DT3050	HD7855	HOSE OIL ENGINE OIL LEAKS	CONNECTOR	REPAIR	3565	0.75	279.3	6
5	DT3050	HD7855	BOLT RETARDER LOCK LOOSER	BOLT	REPLACE PARTS	3529	0.50	29	4
6	DT3050	HD7855	CLAMP RADIATOR LEAKS	RADIATOR	REPLACE PARTS	7209	4.00	0	32
7	DT3050	HD7855	COOLANT LEVEL ON	WATER RADIATOR	REPAIR	9022	1.00	770.29	8
8	DT3050	HD7855	FUEL PIPING FIP LEAK	BOLT	RETIGHTEN	13405	0.25	0	2
9	DT3050	HD7855	THERMOSTAT ERROR 01	HOSE	RETIGHTEN	13606	1.50	0	12
10	DT3050	HD7855	WATER PUMP LEAKAGE	WATER PUMP	REPLACE PARTS	13935	8.66	346.5	69.28
11	DT3050	HD7855	ERROR 01 COOLANT LEVEL ON	WATER COOLANT	REPAIR	13959	1.00	0	8
12	DT3050	HD7855	ERROR 01	S/C : 34447	ADD OIL	14166	0.42	481.63	3.36
13	DT3050	HD7855	FIP LEAKAGE	6553-00-1200	REPLACE PARTS	15123	1.50	29	12
14	DT3050	HD7855	FIP. LEAK RH	FIP	REPOSITION	15171	4.75	0	38
Jumlah								2082.02	255.28
Total Cost								2337.3	
N (Jml Gagal)								14	
Avg. Cost (C1)								166.95	

Jumlah biaya didapat dari penjumlahan *material cost* dan *operator cost* yaitu \$ 2337.3. Karena jumlah kegagalan 14 maka *average cost* menjadi \$ 165.95. Biaya lebih kecil dari sebelumnya karena tindakan *replace parts* lebih sedikit sehingga biaya material menjadi kecil.

c. *Dump truck (DT) 3051***Tabel 4.3** Data Perhitungan Biaya *DT* 3051

No	EQUIP.	EGI	WO. DESCRIPTION	FAILURE PART	ACTION	HMR	DURATION	MATERIAL COST	OPERATOR COST
1	DT3051	HD7855	CYL. HEAD REPAIR ENGINE BL	BACKLOG	REPLACE PARTS	354	2.00	182.5	16
2	DT3051	HD7855	STARTING MTR. STOP ENGINE LOOSEN S13WF	STARTING MOTOR	ADJUST / RESET	1242	0.75	12.79	6
3	DT3051	HD7855	FILTER AIR LEAK PIT 10	FILTER	REPLACE PARTS	2165	0.75	95.2	6
4	DT3051	HD7855	HOSE RADIATOR LEAKS	HOSE	REPLACE PARTS	3187	0.75	718.9	6
5	DT3051	HD7855	FUSE ENGINE STOP DURING OPERATION	FUSE	REPLACE PARTS	4407	1.25	0	10
6	DT3051	HD7855	ELECT. ENGINE STOP DURING OPERATION	ELECTRIC	REPAIR	4858	0.58	20.49	4.64
7	DT3051	HD7855	OTHERS FICKLAAN LEAKS	FILTER	REPLACE PARTS	5336	1.25	95.2	10
8	DT3051	HD7855	WATER PUMP LEAK	PUMP	REPLACE PARTS	5568	9.00	1751.07	72
9	DT3051	HD7855	TURBO BLACK SMOKE PIT 10	TURBO CHARGER	REPLACE PARTS	5936	8.33	3334	66.64
10	DT3051	HD7855	FILTER OIL ENGINE LEAK	FILTAKLEEN	RETIGHTEN	7797	1.58	0	12.64
11	DT3051	HD7855	HOSE OIL CULLER LEAK	HOSE	REPLACE PARTS	10153	1.92	124.6	15.36
12	DT3051	HD7855	WATER PUMP ENGINE OIL & COOLINT LEAKS	WATER PUMP	REPLACE PARTS	10521	3.00	1370.74	24
13	DT3051	HD7855	WATER PUMP OIL ENGINE LEAK	WATER PUMP	REPLACE COMP. ASSY	10505	5.50	1415.84	44
14	DT3051	HD7855	OTHERS ERROR 01	BOLT FIP	RETIGHTEN	10966	2.50	7.8	20
15	DT3051	HD7855	POTENSIO Error D2 (CO 59)	ACCELERATOR PE	REPAIR	15550	0.17	0	1.36
Jumlah								9129.13	314.64
Total Cost								9443.77	
N (Jml Gagal)								15	
Avg. Cost (C1)								629.5846667	

Dari tabel dapat terlihat *total cost* \$ 9443.77 *average cost* adalah \$ 629.58 dengan jumlah kegagalan 15. Besarnya biaya karena tindakan *replace parts* untuk part "Pump" sangat tinggi biayanya.

d. *Dump truck (DT) 3057*

Tabel 4.4 Data Perhitungan Biaya DT 3057

No	EQUIP.	EGI	WO. DESCRIPTION	FAILURE PART	ACTION	HMR	DURATION	MATERIAL COST	OPERATOR COST	
1	DT3057	HD7855	STARTING MTR. ENGINE STOP DURING OPERATION	SUITEZ	STARTING	REPAIR	5550	3.00	0	24
2	DT3057	HD7855	BL : FOLLOW UP PAP		FOLLOW UP PAP	REPLACE PARTS	6155	1.00	0	8
3	DT3057	HD7855	WATER PUMP BL : REPAIR ENGINE	ENGINE	REPLACE PARTS	6827	7.50	359.27	0	60
4	DT3057	HD7855	OTHERS BL : REPAIR ENGINE	ENGINE	REPLACE PARTS	7060	13.50	5412.07	0	109
5	DT3057	HD7855	WATER PUMP LEAK	WATER PUMP	REPLACE PARTS	8007	7.00	670.31	0	56
6	DT3057	HD7855	BL : REPAIR ENGINE	DAMPER ENGINE	REPLACE PARTS	8501	15.00	832.46	0	120
7	DT3057	HD7855	CENTRAL GREASE LEAK	HOSE	REPLACE PARTS	10746	1.00	40.41	0	8
8	DT3057	HD7855	ERROR 01	WATER PUMP	REPLACE COMP. ASSY	11089	9.00	61.44	0	72
9	DT3057	HD7855	FIP. PRIMMING PUMP LOOSEN	DK152200-5420	REPLACE PARTS	12027	2.00	0	0	16
10	DT3057	HD7855	WATER COOLANT LEVEL ON HOSE	HOSE	REPLACE PARTS	12081	10.00	81.2	0	80
11	DT3057	HD7855	ERROR 01	COOLANT	ADJUST / RESET	12262	0.40	40.17	0	3.2
12	DT3057	HD7855	ERROR 01	COOLANT	ADJUST / RESET	12334	0.40	0	0	3.2
13	DT3057	HD7855	error 01	WATER	RETIGHTEN	12048	0.50	0	0	4
14	DT3057	HD7855	ERROR 01	RADIATOR CAP	REPAIR	12423	4.00	0	0	32
15	DT3057	HD7855	ERROR 01	RADIATOR WATER	REPAIR	12452	0.33	0	0	2.64
16	DT3057	HD7855	SENSOR WATER LEVEL ON	TAMBAH AIR RADITOR	REPAIR	12843	23.25	0	0	186
17	DT3057	HD7855	WARNING LAMP COOLANT LEVEL LIGHT ON	RADIATOR	REPAIR	12756	0.50	0	0	4
18	DT3057	HD7855	WATER RADIATOR LEVEL DOWN	COOLANT RADIATOR	REPAIR	12423	1.50	66.55	0	12
19	DT3057	HD7855	OIL ENGINE LEAK	FILTAKLEEN	REPLACE PARTS	14492	3.00	26.77	0	24
20	DT3057	HD7855	Warning lamp collan level light on	RADIATOR	ADD OIL	15198	0.17	481.63	0	1.36
								Jumlah	8074.28	624.4
								Total Cost	8898.68	
								N (Jml Gagal)	19	
								Avg. Cost (C1)	468.3515789	

Dari tabel dapat terlihat *total cost* \$ 8898.68, *average cost* \$ 468.3515789 dengan jumlah kegagalan 19. Perbedaan antara jumlah kegagalan "19" dengan jumlah pada kolom nomor "20" karena terdapat 2 data kegagalan yang terjadi pada *HMR* yang sama. Data *HMR* yang sama ditandai dengan warna kuning. Jadi jumlah kegagalan berdasarkan jumlah *HMR* yang berbeda.

e. *Dump truck (DT) 3058*

Tabel 4.5 Data Perhitungan Biaya DT 3058

No	EQUIP.	EGI	WO. DESCRIPTION	FAILURE PART	ACTION	HMR	DURATION	MATERIAL COST	OPERATOR COST	
1	DT3058	HD7855	WATER PUMP BL : REPAIR ENGINE	ENGINE	REPLACE PARTS	7118	5.00	32.2	40	
2	DT3058	HD7855	OIL ENGINE LEAKS	HOSE	REPLACE PARTS	7440	1.00	26.77	8	
3	DT3058	HD7855	HOSE GREASE LEAK	HOSE	REPLACE PARTS	11155	0.34	40.41	2.72	
4	DT3058	HD7855	FIP FUEL FIP LEAK'S	FIP	RETIGHTEN	13130	0.50	0	4	
								Jumlah	101.38	54.72
								Total Cost	156.1	
								N (Jml Gagal)	4	
								Avg. Cost (C1)	39.025	

Dari tabel dapat terlihat *total cost* \$ 156.1, *average cost* adalah \$ 39.825 dengan jumlah kegagalan 4. Walaupun nilai *HMR dump truck* sudah tinggi yaitu 13130 *hourmeter* tetapi jumlah kegagalan yang sangat sedikit menyebabkan biaya menjadi sangat kecil.

f. *Dump truck (DT) 3073***Tabel 4.6** Data Perhitungan Biaya *DT 3073*

No	EQUIP	EGI	WO DESCRIPTION	FAILURE PART	ACTION	HMR	DURATION	MATERIAL COST	OPERATOR COST
1	DT3073	HD7855	BL : REPAIR ENGINE	ENGINE	REPLACE PARTS	1856	4.00	78.04	32
2	DT3073	HD7855	FUEL TANK LEAKS	FIP	RETIGHTEN	2467	1.25	0	10
3	DT3073	HD7855	BL : REPAIR ENGINE		REPLACE PARTS	2770	0.00	2732.49	0
4	DT3073	HD7855	FIP. FUEL LEAK SU1EC	FIP	REINSTALL	3822	0.75	0	6
5	DT3073	HD7855	WATER PUMP BL : REPAIR ENGINE	ENGINE	REPLACE PARTS	5374	4.00	384.48	32
6	DT3073	HD7855	PIPING RADIATOR LEAKS	CLAMP	REPAIR	6256	1.00	0	8
7	DT3073	HD7855	HOSE RADIATOR LEAKS	HOSE	REPLACE PARTS	6364	2.67	718.9	21.36
8	DT3073	HD7855	EXHAUST MN. BL : REPAIR MUFFLER	MUFFLER	REPLACE PARTS	10562	2.00	1283.92	16
9	DT3073	HD7855	WATER PUMP ENGINE OVER HEAT	WATER PUMP	REPLACE COMP. ASSY	11293	7.42	1415.84	59.36
10	DT3073	HD7855	pipng radiator leak	WATER PUMP	REPLACE COMP. ASSY	11378	2.50	1415.84	20
Jumlah								8029.51	204.72
Total Cost								8234.23	
N (Jml Gagal)								10	
Avg. Cost (C1)								823.423	

Dari tabel terlihat *total cost* \$ 8234.23, *average cost* adalah \$ 823.423 dengan jumlah kegagalan 10. Walaupun jumlah kegagalan masih tergolong sedang tetapi biaya cukup tinggi dikarenakan 70 persen dari tindakan yang dilakukan adalah *replace parts* sehingga biaya material sangat tinggi.

g. *Dump truck (DT) 3075***Tabel 4.7** Data Perhitungan Biaya *DT 3075*

No	EQUIP	EGI	WO DESCRIPTION	FAILURE PART	ACTION	HMR	DURATION	MATERIAL COST	OPERATOR COST
1	DT3075	HD7855	BL : REPAIR ENGINE	REPAIR ENGINE	REPLACE PARTS	1891	5.50	10.94	44
2	DT3075	HD7855	BL : REPAIR ENGINE		REPLACE PARTS	2335	0.00	2732.49	0
3	DT3075	HD7855	FIP LEAKS	CONNECTOR	RETIGHTEN	4225	0.50	0	4
4	DT3075	HD7855	WATER PUMP BL : REPAIR ENGINE	ENGINE	REPLACE PARTS	5312	4.00	150.82	32
5	DT3075	HD7855	FIP. GOVERNOR ERROR 04	GOVERNOR	REPLACE PARTS	8122	2.83	146.3	22.64
6	DT3075	HD7855	FIP. PRIMMING PUMP BROKEN	DK15220-5420	REPLACE PARTS	11037	2.00	0	16
7	DT3075	HD7855	HOSE OIL BY PASS FILTER LEAKS	HOSE	REPLACE PARTS	11806	1.00	28.77	8
8	DT3075	HD7855	SOLENOID Error 04	GOVERNOR SOLENOID	REPLACE PARTS	12161	7.50	0	60
9	DT3075	HD7855	POTENSIO ERROR 02	PEDAL GAS	REPLACE PARTS	13101	4.00	0	32
10	DT3075	HD7855	WATER PUMP LEAK	6215-61-1403	REPLACE PARTS	19061	8.94	750.1	71.52
11	DT3075	HD7855	WATER PUMP WATER TEMPERATUR OVER HEAT	WATER PUMP	REPAIR	13368	7.67	42.8	61.36
12	DT3075	HD7855	ERROR CU23	CAP RADIATOR	REPAIR	13368	1.00	0	8
13	DT3075	HD7855	WATER TEMPERATUR OVER HEAT	561-03-64102	CLEAN	13368	7.00	665.7	56
14	DT3075	HD7855	FIP LEAKS	07085-01412	REPLACE PARTS	13984	2.75	29	22
15	DT3075	HD7855	FIP LH LEAK OF FUEL	WASHER BOLT	REPAIR	14055	0.33	0	2.64
16	DT3075	HD7855	FIP LEAKS	FIP	RETIGHTEN	14096	1.00	0	8
17	DT3075	HD7855	FIP LEAKS	BOLT FIP	REPLACE PARTS	14113	0.50	29	4
18	DT3075	HD7855	FUEL PIPING RITTEN FIP LEAK	FIP	RETIGHTEN	14040	0.25	0	2
Jumlah								4585.92	454.16
Total Cost								5040.08	
N (Jml Gagal)								16	
Avg. Cost (C1)								315.005	

Dari tabel terlihat *total cost* \$ 5040.06, *average cost* adalah \$ 315.005 dengan jumlah kegagalan 16. Karena terdapat 3 kesamaan dalam waktu *HMR* maka jumlah data 18 menjadi 16 kegagalan. Jumlah kegagalan tergolong tinggi karena rata-rata jumlah kegagalan adalah 12. Tetapi biaya *maintenance* tergolong rendah jika dibandingkan dengan rata-rata biaya *maintenance* \$ 840.2227. Hal ini dapat terjadi karena biaya material yang dikeluarkan tidak terlalu tinggi.

h. *Dump truck (DT) 3076***Tabel 4.8** Data Perhitungan Biaya *DT 3076*

No	EQUIP.	EGI	WO. DESCRIPTION	FAILURE PART	ACTION	HMR	DURATION	MATERIAL COST	OPERATOR COST
1	DT3076	HD7855	FIP LEAKING SU1EC	BOLT	REPLACE PARTS	2128	1.75	29	14
2	DT3076	HD7855	BL: V-BELT ALTERNATOR BROKEN		REPLACE PARTS	3364	0.00	0	0
3	DT3076	HD7855	WATER PUMP WATER RADIATOR LEAKS	WATER PUMP	REPLACE PARTS	4613	6.17	670.31	49.36
4	DT3076	HD7855	SWITCH START ENGINE CANT STOP	MASKER KEY	REPAIR	5216	0.33	173	2.64
5	DT3076	HD7855	WATER PUMP BL: REPAIR ENGINE	ENGINE	REPLACE PARTS	5625	4.00	73.33	32
6	DT3076	HD7855	WATER PUMP LEAK	6215-61-1505	REPLACE PARTS	9411	14.00	1403.8	112
7	DT3076	HD7855	BL: REPAIR ENGINE	ENGINE	REPLACE PARTS	9313	4.00	2732.49	32
8	DT3076	HD7855	BL: REPAIR ENGINE	ENGINE	REPLACE PARTS	9810	4.00	2732.49	32
Jumlah								7814.42	274
Total Cost								8088.42	
N (Jml Gagal)								8	
Avg. Cost (C1)								1011.0525	

Dari tabel terlihat *total cost* \$ 8088.42, *average cost* adalah \$ 1011.0525 dengan jumlah kegagalan 8. Walaupun jumlah kegagalan tergolong kecil tetapi biaya tinggi dikarenakan 87.5 persen dari tindakan yang dilakukan adalah *replace parts* sehingga biaya material sangat tinggi.

i. *Dump truck (DT) 3083***Tabel 4.9** Data Perhitungan Biaya *DT 3083*

No	EQUIP.	EGI	WO. DESCRIPTION	FAILURE PART	ACTION	HMR	DURATION	MATERIAL COST	OPERATOR COST
1	DT3083	HD7855	FUEL PIPING RITTEN TO FIP LEAK	07005-01212	REPAIR	2440	1.25	1.2	10
2	DT3083	HD7855	FUEL FILTER TANK LEAKS BL	FILTER FUEL	REPLACE PARTS	2791	2.00	640.08	16
3	DT3083	HD7855	FUEL ENGINE CONTAMINASI	FUEL	CLEAN	5252	5.00	0	40
4	DT3083	HD7855	WATER PUMP BL: REPAIR ENGINE	ENGINE	REPLACE PARTS	5314	4.50	1722.88	36
5	DT3083	HD7855	COVER OIL ENGINE LOOSE	COVER	REPLACE PARTS	6558	1.50	0	12
6	DT3083	HD7855	FILTER OIL ERROR 02	ENGINE SYSTEM	CLEAN	8226	1.25	0	10
7	DT3083	HD7855	BL: REPAIR ENGINE	ENGINE	REPLACE PARTS	8021	14.00	3948.6	112
8	DT3083	HD7855	CABLE ERROR 02	CONNECTOR	CLEAN	11643	1.00	3.31	8
Jumlah								6316.07	244
Total Cost								6560.07	
N (Jml Gagal)								8	
Avg. Cost (C1)								820.00875	

Dari tabel terlihat *total cost* \$ 6560.07, *average cost* adalah \$ 820.008 dengan jumlah kegagalan 8.

j. *Dump truck (DT) 3106***Tabel 4.10** Data Perhitungan Biaya *DT 3106*

No	EQUIP.	EGI	WO. DESCRIPTION	FAILURE PART	ACTION	HMR	DURATION	MATERIAL COST	OPERATOR COST
1	DT3106	HD7855	DT3106	ENGINE	REPLACE PARTS	814	3.00	156.7	24
2	DT3106	HD7855	FILTER OIL TRAVEL LEAKS	FILTER	REPLACE PARTS	1995	1.25	7.7	10
3	DT3106	HD7855	SELENOID FIP. Error 02 c04	SELENOID PRESTOCK	REPAIR	12461	13.50	637.8	108
Jumlah								802.2	142
Total Cost								944.2	
N (Jml Gagal)								3	
Avg. Cost (C1)								314.7333333	

Dari tabel terlihat *total cost* \$ 944.2, *average cost* \$ 314.73333 dengan jumlah kegagalan 3. Data kegagalan *dump truck* ini memiliki jumlah paling sedikit. Walaupun sedikit data ini sudah cukup diolah karena syarat dalam mengolah data *repairable system* paling sedikit dua kegagalan.

k. *Dump truck* (DT) 3085

Tabel 4.11 Data Perhitungan Biaya *DT* 3085

No	EQUIP	EGI	WO DESCRIPTION	FAILURE PART	ACTION	HMR	DURATION	MATERIAL COST	OPERATOR COST
1	DT3085	HD7855	ENGINE STOP DURING OPERATOR	LOCK	REPLACE PARTS	225	1.25	0	10
2	DT3085	HD7855	STARTING MTR. CANT START	STARTING MOTOR	REPAIR	1392	0.42	0	3.36
3	DT3085	HD7855	OTHERS REPAIR ENGINE BL	ENGINE	REPLACE PARTS	1817	3.00	2081	24
4	DT3085	HD7855	BL : REPAIR ENGINE		REPLACE PARTS	2333	0.00	2732.49	0
5	DT3085	HD7855	GOVERNOR AIR BL : REPAIR ENGINE	AIR GOVERNOR	REPLACE PARTS	2333	5.75	53.4	46
6	DT3085	HD7855	WATER PUMP BL : REPAIR ENGINE	ENGINE	REPLACE PARTS	5291	4.50	52.8	36
7	DT3085	HD7855	AIR RADIATOR LEAK	WATER PUMP	REPAIR	6525	5.00	0	40
8	DT3085	HD7855	BL : REPAIR ENGINE	REPAIR ENGINE	REPLACE PARTS	8100	7.00	3519.74	56
9	DT3085	HD7855	WATER HOSE COOLENT LEVEL FLASH ON	HOSE	REPLACE PARTS	8855	6.00	81.2	48
10	DT3085	HD7855	ERROR 04	WATER RADIATOR	ADD OIL	9575	0.42	481.63	3.36
11	DT3085	HD7855	SELENOID ERROR 02	GOVERNOR	REPAIR	10325	2.00	0	16
12	DT3085	HD7855	FIP. OIL ENGINE LEAKS	FIP	RETIGHTEN	9948	1.00	26.1	8
13	DT3085	HD7855	FUEL PIPING ERROR 04	PIPING	CLEAN	10013	11.50	0	92
14	DT3085	HD7855	OIL ENGINE LEAK	6215-71-5660	REPLACE PARTS	10013	1.00	3948.6	8
15	DT3085	HD7855	WELDING BRACKET FOG LAMP	DK487020-2200	REPAIR	10407	6.50	2.4	52
16	DT3085	HD7855	THERMOSTAT COOLANT LEVEL LIGHT ON	CLAMP HOSE	REPLACE PARTS	11828	1.50	81.2	12
17	DT3085	HD7855	COOLANT LEVEL ON	RADIATOR	REPAIR	11568	1.50	0	12
18	DT3085	HD7855	COOLANT LEVEL ON	WATER RADIATOR	ADD OIL	11750	0.50	481.63	4
19	DT3085	HD7855	RADIATOR LEAK	HOSE RADIATOR	REPLACE PARTS	12871	0.25	718.9	2
								Jumlah	472.72
								Total Cost	14733.81
								N (Jml Gagal)	17
								Avg. Cost (C1)	866.6947059

Dari tabel terlihat *total cost* \$ 14733.81, *average cost* \$ 866.6947059 dengan jumlah kegagalan 17. Data *HMR* yang diberi warna menandakan terdapat 2 macam data yang *HMR*nya sama. Ini berarti data berjumlah 19 menjadi 17 kegagalan.

l. *Dump truck* (DT) 3084

Tabel 4.12 Data Perhitungan Biaya *DT* 3084

No	EQUIP	No	EGI	WO DESCRIPTION	FAILURE PART	ACTION	HMR	DURATION	MATERIAL COST	OPERATOR COST
1	DT3084		HD7855	RETARDER ABNORMAL	RETARDER	ADJUST / RESET	893	0.75	0	6
2	DT3084		HD7855	OTHERS REPAIR ENGINE BL	ENGINE	REPLACE PARTS	1806	3.00	2081	24
3	DT3084		HD7855	HOSE OIL ENGINE LEAKS	HOSE	REPLACE PARTS	6419	3.50	28.77	28
4	DT3084		HD7855	SELENOID ERROR 02	6553-81-3211	REPLACE PARTS	8247	4.00	318.9	32
5	DT3084		HD7855	FILTER OIL ERROR 02	ENGINE OIL	CLEAN	8325	1.00	0	8
6	DT3084		HD7855	FIP. ERROR 02	6553-81-5212	REPAIR	9379	2.50	1693.3	20
7	DT3084		HD7855	TENSION PULLEY BL : REPAIR ENGINE	TENSION PULLEY	REPLACE PARTS	10072	7.50	943.76	60
8	DT3084		HD7855	FIP. leak	07206-31014	RETIGHTEN	10947	9.99	0	79.92
9	DT3084		HD7855	water pump leak	WATER PUMP	REPLACE PARTS	11200	10.50	160.1	84
10	DT3084		HD7855	water pump leak	6215-61-1505	REBUILD	12057	6.50	1403.8	52
11	DT3084		HD7855	RADIATOR LEAKAGE	CLAMP	REPAIR	13562	0.25	0	2
12	DT3084		HD7855	Warning lamp collan level light on	HOSE	REPLACE PARTS	13645	3.17	39.3	25.36
								Jumlah	421.28	
								Total Cost	7090.21	
								N (Jml Gagal)	12	
								Avg. Cost (C1)	590.8508333	

Dari tabel terlihat *total cost* \$ 7090.21, *average cost* adalah \$ 590.8508333 dengan jumlah kegagalan 12.

m. *Dump truck* (DT) 3086

Tabel 4.13 Data Perhitungan Biaya *DT* 3086

No	EQUIP.	EGI	WO DESCRIPTION	FAILURE PART	ACTION	HMR	DURATION	MATERIAL COST	OPERATOR COST
1	DT3086	HD7855	FIP. LINKAGE ENGINE OVERHEAT	LINKAGE VALVE	ADJUST / RESET	34	2.25	0	18
2	DT3086	HD7855	FUEL FILTER ASAP PUTIH	FUEL FILTER	CLEAN	42	0.42	66.64	3.36
3	DT3086	HD7855	HOSE RAIN RADIATOR LEAK	HOSE	REPOSITION	1469	1.50	0	12
4	DT3086	HD7855	HOSE OIL ENGINE LEAKST	HOSE	REPLACE PARTS	4732	2.00	28.77	16
5	DT3086	HD7855	WATER PUMP BL : REPAIR ENGINE	ENGINE	REPLACE PARTS	3900	2.00	1246.47	16
6	DT3086	HD7855	FIP. SEAL FRONT FIP LEAKS	FIP	REPLACE PARTS	6654	10.50	29	84
7	DT3086	HD7855	BL : DIFEERENTIAL BANYAK BERAM	DIFERENRIAL	REPLACE PARTS	6323	33.50	5522.25	268
8	DT3086	HD7855	OTHERS BL : REPAIR ENGINE	COUPLER	REPLACE PARTS	7566	4.00	468.64	32
9	DT3086	HD7855	V-BELT ENGINE BROKEN	V-BELT	REPLACE PARTS	8574	1.55	0	12.4
10	DT3086	HD7855	COOLANT LEVEL ON & ERROR 01	AIR COLLANT	REPAIR	8938	5.17	0	41.36
11	DT3086	HD7855	OTHERS BL : REPAIR ENGINE	ENGINE	REPLACE PARTS	9298	4.00	2081	32
12	DT3086	HD7855	OTHERS BL : REPAIR ENGINE	ENGINE	REPLACE PARTS	10052	4.00	1188.91	32
13	DT3086	HD7855	ERROR 01	WATER COOLANT	REPAIR	10375	0.50	0	4
14	DT3086	HD7855	warning lamp collan level error	WATER COOLANT	ADD OIL	10075	0.50	481.63	4
15	DT3086	HD7855	HOSE COMPRESSOR ERROR 01	6215-81-5320	REPLACE PARTS	10388	3.00	33.8	24
16	DT3086	HD7855	WATER MN. COOLANT LEVEL FLASH ON	PIPING	REPAIR	10791	1.50	0	12
17	DT3086	HD7855	WATER PUMP BL : REPAIR ENGINE	BACKLOG	REPLACE PARTS	10283	3.00	3295.5	24
18	DT3086	HD7855	error 05 / engine lo power	CAP RADIATOR	REPLACE PARTS	10772	2.50	401.6	20
19	DT3086	HD7855	WATER COOLANT LEAK'S	AIR SYSTEM	REPAIR	11101	1.00	0	8
20	DT3086	HD7855	TURBO tip leak	TURBO	REPLACE PARTS	12151	15.17	3412.9	121.36
21	DT3086	HD7855	TENSION PULLEY BOLT JUSTER FAIN VOLT LOOSE	6215-81-3850	REPOSITION	12891	1.00	0	8
22	DT3086	HD7855	HOSE OIL CULLER LEAK	HOSE	REPLACE PARTS	13062	0.50	18.32	4
								Jumlah	796.48
								Total Cost	19081.91
								N (Jml Gagal)	22
								Avg. Cost (C1)	867.3595455

Dari tabel terlihat *total cost* \$ 19081.91, *average cost* \$ 867.3595455 dengan jumlah kegagalan 22.

n. *Dump truck* (DT) 3087

Tabel 4.14 Data Perhitungan Biaya *DT* 3087

No	EQUIP.	EGI	WO DESCRIPTION	FAILURE PART	ACTION	HMR	DURATION	MATERIAL COST	OPERATOR COST
1	DT3087	HD7855	COLANT LEVEL LIGHT ON SU1E	RADIATOR	ADD OIL	3705	0.50	481.63	4
2	DT3087	HD7855	FUEL PIPING SYSTEM LEAKS	FUEL PIPING	REPAIR	6143	9.50	0	76
3	DT3087	HD7855	FUEL PIPING LEAK'S	PIPING	REPLACE PARTS	7609	1.00	264.3	8
4	DT3087	HD7855	OTHERS PLUG OIL ENGINE LOOSE	PLUG OIL	REPOSITION	10528	0.50	141.17	4
5	DT3087	HD7855	BL : CAP RADIATOR LEAKS	CAP RADIATOR	REPLACE PARTS	10699	7.00	1094.36	56
6	DT3087	HD7855	colan level light on	WATER	REPAIR	10528	0.50	0	4
7	DT3087	HD7855	error 01 / water colan level loght on	6205-81-5262	REPLACE COMP. ASSY	11974	3.00	665.7	24
8	DT3087	HD7855	WATER COOLANT LEVEL ON	HOSE	RETIGHTEN	12701	0.50	0	4
9	DT3087	HD7855	WATER COOLANT LEVEL ON	AIR COOLANT	ADD OIL	13230	0.25	481.63	2
								Jumlah	182
								Total Cost	3310.79
								N (Jml Gagal)	8
								Avg. Cost (C1)	413.84875

Dari tabel terlihat *total cost* \$ 3310.79, *average cost* \$ 413.84875 dengan jumlah kegagalan 8.

o. Dump truck (DT) 3099

Tabel 4.15 Data Perhitungan Biaya DT 3099

No	EQUIP No	EGI	WO DESCRIPTION	FAILURE PART	ACTION	HMR	DURATION	MATERIAL COST	OPERATOR COST
1	DT3099	HD7855	WATER PUMP BL : REPAIR ENGINE	ENGINE	REPLACE PARTS	4336	4.00	1722.88	32
2	DT3099	HD7855	ENGINE STOP MULFUNCTION	EMERGENCY STOP	REPLACE PARTS	6572	0.50	22.73	4
3	DT3099	HD7855	BATTERY AIR MINUS	N200AH	ADD OIL	8114	0.50	182	4
4	DT3099	HD7855	BL : REPAIR ENGINE	BACKLOG	REPLACE PARTS	7840	4.00	3683.9	32
5	DT3099	HD7855	BL : REPAIR ENGINE	BACKLOG	REPLACE PARTS		4.00	2356.27	32
6	DT3099	HD7855	FIP. LEAKS	BOLT	REPLACE PARTS	11291	1.00	29	8
7	DT3099	HD7855	FUEL PIPING ERROR 04	6553-00-1114	REPLACE PARTS	12474	27.50	15761.8	220
8	DT3099	HD7855	WATER MN. COOLANT LEVEL LOW (E 01)	CLAMP HOSE	RETIGHTEN	12075	11.67	87.77	93.36
9	DT3099	HD7855	WATER PUMP LEAKS & ERROR 1	6216-61-1504	REPLACE COMP. ASSY	12075	6.50	1403.8	52
10	DT3099	HD7855	ENGINE LOW POWER	CLAMP RADIATOR	REPLACE PARTS	12499	0.50	94.4	4
Jumlah								25344.55	481.36
Total Cost								25825.91	
N (Jml Gagal)								8	
Avg. Cost (C1)								3228.23875	

Dari tabel terlihat *total cost* \$ 25825.91, *average cost* \$ 3228.23875 dengan jumlah kegagalan 8. Terdapat satu data yang tidak ada nilai *HMR* dan terdapat data yang memiliki nilai *HMR* sama maka jumlah data 10 menjadi 8 untuk jumlah kegagalan. Pada *dump truck* ini biaya *maintenance* tertinggi karena setiap kegagalan terdapat biaya material.

p. Dump truck (DT) 786

Tabel 4.16 Data Perhitungan Biaya DT 786

No	EQUIP	EGI	WO DESCRIPTION	FAILURE PART	ACTION	HMR	DURATION	MATERIAL COST	OPERATOR COST
1	DT786	HD7855	ROCKER ARM REPAIR ENGINE BL	ENGINE	REPLACE PARTS	4326	2.00	155.2	16
2	DT786	HD7855	HOSE OIL CULLER LEAK	HOSE	REPLACE PARTS	5892	9.42	148.56	75.36
3	DT786	HD7855	BL : REPAIR ENGINE	BACKLOG	REPLACE PARTS	6049	0.00	2732.49	0
4	DT786	HD7855	FILTER OIL ENGINE OIL LEAKING	O-RING	REPLACE PARTS	6314	0.50	47.4	4
5	DT786	HD7855	RADIATOR LEAKS	PUMP	REPAIR	9675	5.50	827.9	44
6	DT786	HD7855	HOSE OIL ENGINE LEAKS	HOSE	REPLACE PARTS	11485	0.75	28.77	6
7	DT786	HD7855	CORROSSION RESISTOR LEAK	BRACKET CORR	REPLACE PARTS	13131	2.08	83.3	16.64
8	DT786	HD7855	BL : REPAIR ENGINE	ENGINE	REPLACE PARTS	13539	11.00	842.37	88
9	DT786	HD7855	FILTER OIL ENGINE LEAK	C 88	REPOSITION	15546	0.25	0	2
10	DT786	HD7855	TURBO CLAMP LOOSE(STBY)	CLAMP	REPLACE PARTS	16201	0.25	94.4	2
11	DT786	HD7855	water pump leak	HOSE	REPAIR	16062	1.00	194.83	8
12	DT786	HD7855	WATER PUMP REPLACE	6216-61-1403	REPLACE COMP.	16139	8.28	1403.8	66.24
13	DT786	HD7855	WATER RADIATOR LEAK	HOSE	REPAIR	16106	2.00	0	16
14	DT786	HD7855	ENGINE COOLANT LEVEL ON	AIR COOLANT	ADD OIL	16680	0.67	26.55	5.36
15	DT786	HD7855	FUEL PIPING FIP LEAKS	PIPING FIP	RETIGHTEN	17513	0.50	0	4
16	DT786	HD7855	FIP & RADIATOR LEAKS	PIPING	REPAIR	17871	2.00	0	16
17	DT786	HD7855	HOSE OIL ENGINE LEAK	HOSE	REPLACE PARTS	18072	1.00	28.77	8
Jumlah								6614.34	377.6
Total Cost								6991.94	
N (Jml Gagal)								17	
Avg. Cost (C1)								411.2905882	

Dari tabel terlihat *total cost* \$ 6991.94, *average cost* \$ 411.2905882 dengan jumlah kegagalan 17.

q. *Dump truck (DT) 3101*

Tabel 4.17 Data Perhitungan Biaya DT 3101

No	EQUIP.	EGI	WO DESCRIPTION	FAILURE PART	ACTION	HMR	DURATION	MATERIAL COST	OPERATOR COST
1	DT3101	HD7855	BL : REPAIR ENGINE		REPLACE PARTS	357	0.00	2732.49	0
2	DT3101	HD7855	CLUMP MUFFLER BROKEN	EXHAUST	REPLACE PARTS	345	7.75	1283.92	62
3	DT3101	HD7855	FIP. ENGINE LOW POWER	COPLING FIP	REPAIR	2554	5.00	119.04	40
4	DT3101	HD7855	FIP LEAK	BOLT	RETIGHTEN	3560	0.50	0	4
5	DT3101	HD7855	WATER PUMP BL : REPAIR ENGINE	ENGINE	REPLACE PARTS	3579	4.00	6.9	32
6	DT3101	HD7855	TURBO CLAMP LOOSE	CLAMP	REPLACE PARTS	7516	1.00	94.4	8
7	DT3101	HD7855	COLANT LEVEL ERROR	S/C : 34447	ADD OIL	8093	0.33	481.63	2.64
8	DT3101	HD7855	WATER COLLENT ON + FOG LAMP SWMCTH ABN	AIR RADIATOR	ADD OIL	9363	0.67	481.63	5.36
9	DT3101	HD7855	BL : CAP RADIATOR BROKEN	BACKLOG	REPLACE PARTS	9825	4.00	188.69	32
10	DT3101	HD7855	Tangkai feul leak	561-04-6A113	REPAIR	11657	11.82	7471.7	94.56
Jumlah								12860.4	260.56
Total Cost								13140.96	
N (Jml Gagal)								10	
Avg. Cost (C1)								1314.096	

Dari tabel terlihat *total cost* \$ 13140.91, *average cost* \$ 1314.091 dengan jumlah kegagalan 10.

r. *Dump truck (DT) 680*

Tabel 4.18 Data Perhitungan Biaya DT 680

No	EQUIP	EGI	WO DESCRIPTION	FAILURE PART	ACTION	HMR	DURATION	MATERIAL COST	OPERATOR COST
1	DT680	HD7855	FIP. OIL LEAK	F.I.P	CLEAN	15207	0.06	0	0.64
2	DT680	HD7855	HOSE OIL LEAK	PIPING	REPAIR	15157	3.50	21.69	28
3	DT680	HD7855	CLAMP EXHAUST PIPE LEAK	561-02-61240	REPLACE PARTS	16662	0.50	37.8	4
4	DT680	HD7855	BL : REPLACE DRING AIR CLEANER	ORING	REPLACE PARTS	16212	3.00	47.4	24
5	DT680	HD7855	FIP. ENGINE WHITE SMOKE	COUPLING F.I.P	REPLACE PARTS	17056	18.17	146.3	145.36
6	DT680	HD7855	FUEL FUEL RETURN LEAKS	GASKET FUEL RETURN LEAKS	REPLACE PARTS	17467	7.00	1129.67	56
7	DT680	HD7855	FIP. ERROR 04(ENGINE LOW POWER)	F.I.P	REPLACE COMP. ASSY		66.67	666.7	533.36
8	DT680	HD7855	FIP. FUEL LEAKS	FUEL FILTER	RETIGHTEN		0.25	0	2
9	DT680	HD7855	FIP. LEAK	BOLT PIPING RETURN	REPAIR	20497	4.00	6.97	32
10	DT680	HD7855	FUEL PIPING FIP LEAKS	PIPING NOZLE	RETIGHTEN	20667	0.33	0	2.64
11	DT680	HD7855	OIL ENGINE BOCOR	O-RING	REPAIR	20490	1.50	0	12
12	DT680	HD7855	FIP LEAKS	BOLT	REINSTALL	21323	1.17	0	9.36
13	DT680	HD7855	ACCIDENT	HOSE BY PASS FILTER	REPAIR	20977	4.00	74.3	32
14	DT680	HD7855	WARNING LAMP ENGINE TEMPERATUR	ENGINE	REPAIR	21049	0.50	0	4
15	DT680	HD7855	RADIATOR LEAKS	CLAMP	REPAIR	21203	1.08	0	8.64
16	DT680	HD7855	FIP LEAKING	FIP	REPLACE COMP. ASSY		9.00	665.7	72
17	DT680	HD7855	HOSE OIL FIP LEAK S11L	HOSE	REPLACE PARTS	21476	1.25	20.96	10
18	DT680	HD7855	HOSE RADIATOR LEAKS	HOSE	REPLACE PARTS	22054	0.75	31.13	6
19	DT680	HD7855	FIP. LEAKS	FIP	REPAIR	22368	1.25	0	10
20	DT680	HD7855	FUEL TANK LEAKS	GASKET	REPAIR	23440	1.50	0	12
21	DT680	HD7855	WATER PUMP ERROR 01	WATER PUMP	REPAIR	23988	1.50	0	12
22	DT680	HD7855	HOSE PIPING HYD OIL LEAKS	PIPING	REPAIR	23988	8.00	0.7	64
23	DT680	HD7855	BL : REPAIR ENGINE	BACKLOG	REPLACE PARTS	24565	4.00	877.76	32
24	DT680	HD7855	FIP LH LEAKS	FIP	REPAIR	25866	2.00	0	16
25	DT680	HD7855	FUEL PIPING FIP LEAKS	6216-71-5221	REPAIR	25660	7.50	26.8	60
26	DT680	HD7855	FUEL PIPING FIP BROKEN	6215-71-5910	REPLACE PARTS	25671	7.00	32.2	56
27	DT680	HD7855	FUEL PIPING FUEL RIGHT BROKEN	VALVE	REPAIR	25851	1.00	0	8
28	DT680	HD7855	FUEL PIPING HOSE FUEL LEAK + NOZZ	6215-71-4231	REPLACE PARTS	25821	2.00	28.9	16
29	DT680	HD7855	HOSE OIL BRAKE COOLING LEAKS	HOSE	REPLACE PARTS	26083	4.33	49.8	34.64
30	DT680	HD7855	FUEL FILTER ENGINE CANT START	07005-00812	REPLACE PARTS	25871	2.00	14.21	16
31	DT680	HD7855	FUEL PIPING FIP LEAK	HOSE	REPLACE PARTS		0.75	20.96	6
32	DT680	HD7855	FUEL PIPING FIP PIPING LEAKS	PIPING FIP	RETIGHTEN	25871	1.50	126.4	12
33	DT680	HD7855	NOZZEL LEAKING	BOLT FIP	RETIGHTEN	26077	0.75	0	6
34	DT680	HD7855	FUEL PIPING FIP LEAK	PIPING	REPAIR		1.50	0	12
35	DT680	HD7855	FIP. LH BRACKET BROKEN	01437 01090	REPAIR	26406	17.50	2.5	140
36	DT680	HD7855	WATER MN. HOSE ERROR 01	HOSE	REPLACE PARTS		2.00	81.2	16
37	DT680	HD7855	WATER TANK LEAKS	WATER TANK	REPAIR		14.00	0	112
38	DT680	HD7855	PANEL COOLANT LEVEL ON	GLASS RESERVOIR TANK	REPLACE PARTS	27617	1.00	0	8
39	DT680	HD7855	FIP LEAKS	6215-71-9990	RETIGHTEN	27690	2.00	11.3	16
40	DT680	HD7855	FUEL PIPING Hose piping feil filter leak	HOSE FUEL	REPLACE PARTS	28191	6.00	264.2	48
Jumlah								4386.55	1694.64
Total Cost								6081.19	
N (Jml Gagal)								31	
Avg. Cost (C1)								196.1674194	

Dari tabel terlihat *total cost* \$ 6081.19, *average cost* \$ 196.1674194 dengan jumlah kegagalan 31. Terdapat 8 data yang tidak memiliki nilai *HMR* dan dua data yang sama nilai *HMR* sehingga data 40 menjadi 31 kegagalan.

s. *Dump truck (DT) 3102***Tabel 4.19** Data Perhitungan Biaya *DT 3102*

No	EQUIP. No	EGI	WO. DESCRIPTION	FAILURE PART	ACTION	HMR	DURATION	MATERIAL COST	OPERATOR COST
1	DT3102	HD7855	RETARDER ABNORMAL	RETARDER	CLEAN	56	0.58	0	4.64
2	DT3102	HD7855	BL : REPLACE ENGINE		REPLACE PARTS	367	0.00	13539	0
3	DT3102	HD7855	EXHAUST MN. MUFFLER BROKEN	EXHAUST PIPE	REPLACE PARTS	1414	4.50	1283.92	36
4	DT3102	HD7855	EXHAUST MN. ENGINE ABNORMAL NOISE	561-02-61312	REPLACE PARTS	6248	4.50	852.07	36
5	DT3102	HD7855	FIP LEAKS	BOLT	REPOSITION	7078	0.58	0	4.64
6	DT3102	HD7855	TUTUP FUEL LEAKS	TUTUP FUEL	REPLACE PARTS	8028	2.17	495.04	17.36
7	DT3102	HD7855	BL : MIDLIFE DAMPER	DAMPER	REPLACE PARTS		4.00	4136.27	32
8	DT3102	HD7855	COMPRESSOR ENGINE NOISE	HEAD COMPRES	REPLACE PARTS	10056	0.25	0	2
9	DT3102	HD7855	WATER PUMP BL : REPAIR ENGINE	BACKLOG	REPLACE PARTS	10838	4.00	561.43	32
10	DT3102	HD7855	Error 01 DO D6	RADIATOR	REPAIR	13120	0.50	0	4
Jumlah								20867.73	168.64
Total Cost								21036.37	
N (Jml Gagal)								9	
Avg. Cost (C1)								2337.374444	

Dari tabel terlihat *total cost* \$ 21036.37, *average cost* \$ 2337.374444 dengan jumlah kegagalan 9. Terdapat satu data yang tidak ada nilai *HMR* maka jumlah data 10 menjadi 9 untuk jumlah kegagalan.

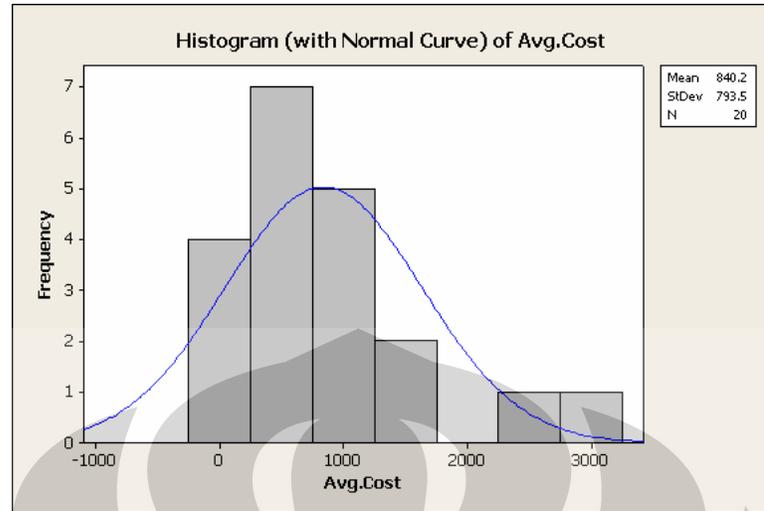
t. *Dump truck (DT) 787***Tabel 4.20** Data Perhitungan Biaya *DT 787*

No	EQUIP	EGI	WO. DESCRIPTION	FAILURE PART	ACTION	HMR	DURATION	MATERIAL COST	OPERATOR COST
1	DT787	HD7855	FUEL PIPING RETURN FUEL LEAK	07005-01012	RETIGHTEN	15183	0.90	16.5	7.2
2	DT787	HD7855	AIR RADIATOR LEAK	6215-61-1403	REPAIR	15292	0.32	1.3	2.56
3	DT787	HD7855	fip leak	07005-01412	RETIGHTEN	18086	0.48	1403.8	3.84
4	DT787	HD7855	WATER MN. BL : TUBE COOLANT LEAKS	BACKLOG	REPLACE PARTS	15460	4.00	219.29	32
5	DT787	HD7855	RADIATOR LEAKING	CLAMP	RETIGHTEN	15923	0.17	0	1.36
6	DT787	HD7855	HOSE AIR WIPER LOOSEN	HOSE	REPOSITION	16181	0.25	0	2
7	DT787	HD7855	FIP. ERROR 02	FIP	REPAIR	16255	11.00	0	88
8	DT787	HD7855	PIPING RADIATOR LEAK	PIPING	RETIGHTEN	16904	5.00	0	40
9	DT787	HD7855	WATER MN. RADIATOR LEAKS	CLAMP HOSE	REPLACE PARTS	16811	0.25	718.9	2
10	DT787	HD7855	HOSE RADIATOR LEAKS	ORING	REPLACE PARTS	17409	1.67	27.65	13.36
11	DT787	HD7855	FUEL PIPING Hose feul filter leak + fip rh leak	HOSE	REPLACE PARTS	17625	0.50	20.96	4
Jumlah								2408.4	196.32
Total Cost								2604.72	
N (Jml Gagal)								11	
Avg. Cost (C1)								236.7927273	

Dari tabel terlihat *total cost* \$ 2604.72, *average cost* \$ 236.7927273 dengan jumlah kegagalan 11.

4.1.2. Analisis Data Awal

Analisis yang digunakan adalah analisis statistik deskriptif untuk menghasilkan gambaran dari data yang telah terkumpul berdasarkan pengolahan data awal. Penyajian data yang telah terkumpul pembahasannya secara deskriptif dilakukan dengan menggunakan histogram.



Gambar 4.1 Rata-rata Biaya *Maintenance*

(Sumber: Minitab)

Statistik deskriptif data menunjukkan sampel memiliki rata-rata *average cost* adalah \$ 840.2227258 dengan standar deviasi \$ 793. Biaya minimum \$ 39 dan biaya maksimum \$ 3228 sehingga data memiliki jangkauan 3189. Nilai *skewness* 1.87, ini berarti kemiringan data positif dan cenderung ke kanan. Kemiringan data ini mengindikasikan bahwa sebagian besar data rata-rata biaya *maintenance* terdistribusi pada daerah kanan yang berarti biaya cenderung besar.

Untuk mengetahui bagaimana hubungan antara jumlah kegagalan dan biaya *maintenance* dilakukan analisis regresi. Jumlah rata-rata kegagalan adalah $12.75 \approx 13$. Terlihat kegagalan terbanyak dimiliki *dump truck* jenis DT 680 yaitu 31 kegagalan dan biaya terbesar adalah DT 3099 yaitu \$ 3228.23875.

Dalam analisis regresi terdapat dua variabel, yaitu sebagai variabel *predictor* yang merupakan variabel bebas dan *response* sebagai variabel terikat atau hasil. Variabel X sebagai variabel bebas adalah N kegagalan sedangkan variabel Y atau response adalah *average maintenance cost*. Analisis untuk menguji apakah terdapat hubungan antara jumlah kegagalan dengan biaya rata-rata *maintenance*. Maka terdapat asumsi:

H0: $B_j = 0$ artinya X_j tidak mempengaruhi Y dan

H1: $B_j \neq 0$ artinya X_j mempengaruhi Y

Regression Analysis: Avg.Cost versus N Kegagalan					
The regression equation is					
Avg.Cost = 1120 – 21.9 N Kegagalan					
Predictor	Coef	SE Coef	T	P	
Constant	1119.7	402.4	2.78	0.012	
N Kegagalan	-21.92	28.25	-0.78	0.448	
S = 801.908 R-Sq = 3.2% R-Sq(adj) = 0.0%					
Analysis of Variance					
Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	387069	387069	0.60	0.448
Residual Error	18	11575012	643056		
Total	19	11962081			

Gambar 4.2 Analisis Regresi

(Sumber: Minitab)

Dari gambar di atas dapat nilai p-value (0.448) lebih besar koefisien signifikansi, $\alpha/2$, (0.025), maka H_0 diterima. Ini berarti tidak ada hubungan antara X dan Y. Jadi banyaknya kegagalan belum membuktikan kalau jumlah biaya semakin besar. Banyak faktor yang mempengaruhi besarnya biaya diantaranya apakah setiap kegagalan membutuhkan biaya material yang besar atau tidak, apakah waktu yang dibutuhkan lama atau tidak.

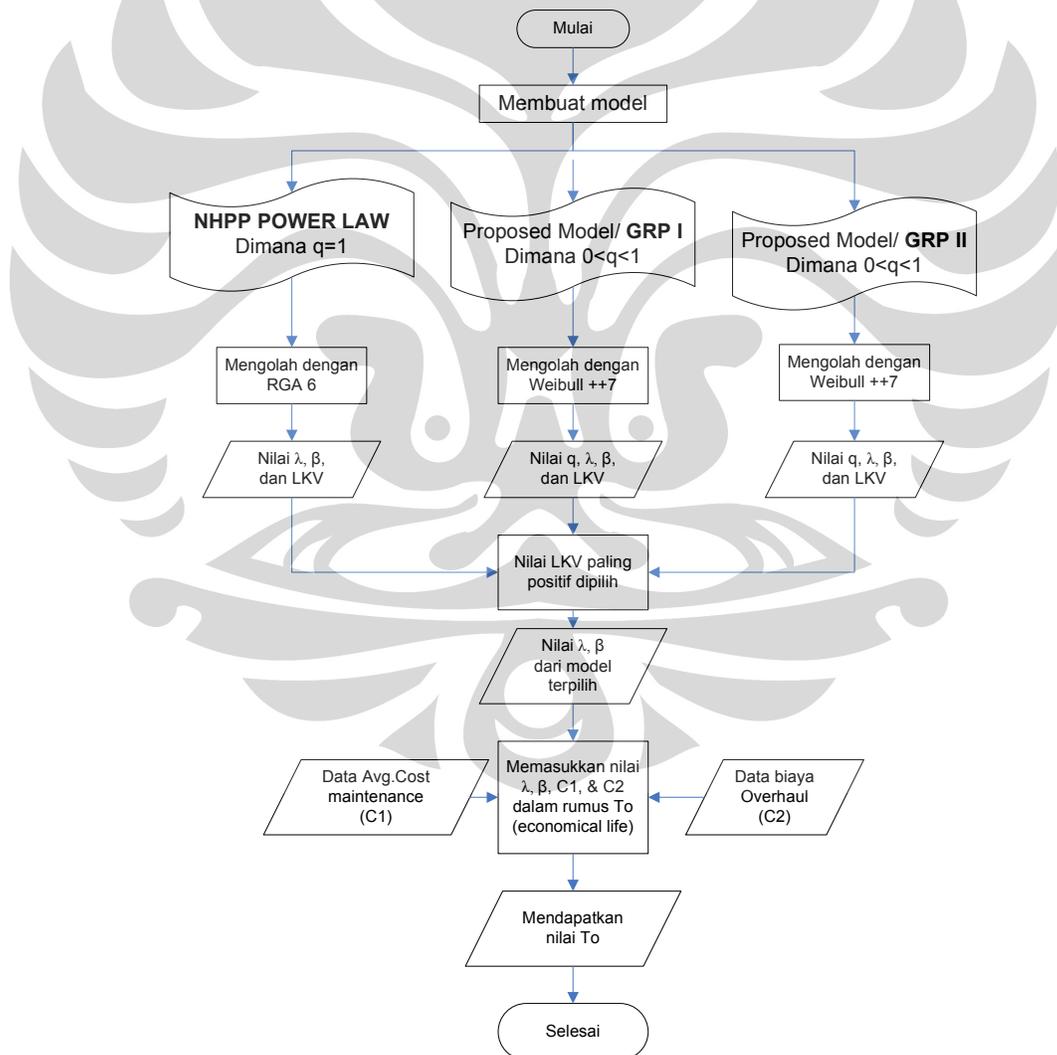
4.2. Model Reliabilitas

Setelah mendapatkan biaya rata-rata *maintenance* setiap *dump truck* maka dilakukan pengolahan data lebih lanjut untuk memodelkan data *hourmeter* ke dalam model reliabilitas pada *repairable systems*. Model yang digunakan dalam penelitian ini adalah model *stochastic point process*. Model ini dipilih karena sistem yang diteliti merupakan *repairable systems*. Pada *repairable system* data kegagalan sistem tidak mengikuti pola *s.i.i.d* (*statistically independent and identically distributed*). Sedangkan asumsi dalam model *stochastic point process* adalah tidak mengikuti pola *s.i.i.d*.

Secara umum pengolahan model dilakukan melalui beberapa tahapan:

1. Membuat model reliabilitas dengan model yang umum dipakai dalam sistem yang dapat diperbaiki (*repairable*), yaitu:
 - a. Model NHPP Power Law, asumsi sistem *as bad as old* dengan nilai $q = 1$.
 - b. Model GRP, asumsi sistem *imperfet repair (between as good as new and as bad as old)* dengan nilai $0 < q < 1$
2. Membandingkan model dan memilih model yang sesuai.
3. Analisis *waktu optimum overhaul*.

Untuk lebih jelasnya maka kita dapat melihat metodologi pengolahan model mencapai waktu optimum overhaul melalui gambar di bawah ini:



Gambar 4.3 Metodologi Model Mencapai To (*Waktu Optimum Overhaul*)

Dalam gambar di atas kita dapat mengetahui langkah-langkah untuk mendapatkan nilai waktu *optimum overhaul*. Metodologi pengolahan di atas adalah kelanjutan pengolahan data setelah melakukan pengolahan data awal. Pengolahan di mulai dengan membuat model reliabilitas menggunakan 3 model yaitu NHPP Power Law, GRP I, dan GRP II yang akan dijelaskan lebih lanjut dalam penjelasan di bawah ini.

Input dalam model reliabilitas ini adalah data waktu kegagalan dalam satuan *hourmeter*. Tabel di bawah ini menampilkan data waktu kegagalan yang menjadi sumber analisis dalam memodelkan sistem.

Tabel 4.21 Data Waktu Kegagalan

No	DT3049	DT3050	DT3051	DT3057	DT3058	DT3073	DT3075	DT3076	DT3083	DT3084	DT3085	DT3086	DT3087	DT3099	DT3101	DT3102	DT3106	DT680	DT786	DT787
1	4429	158	354	5560	7118	1856	1891	2128	2440	893	225	34	3705	4336	345	56	814	157	4326	1305
2	4995	1874	1242	6155	7440	2467	2335	3364	2791	1806	1392	42	6143	6572	357	367	1995	207	5892	1414
3	5427	2757	2185	6827	11155	2770	4225	4613	5252	6419	1817	1469	7609	7840	2554	1414	12461	1212	6049	1582
4	6465	3529	3187	7080	13130	3822	5312	5216	5314	8247	2333	3900	10528	8114	3580	6248		1662	6314	2045
5	7090	3565	4407	8007		5374	8122	5625	6568	8825	5291	4732	10699	11291	3579	7078		2056	9875	2208
6	7788	7209	4858	8501		6256	11037	9313	8021	9379	6525	6323	11974	12075	7516	8028		2467	11485	2303
7	7940	9022	5336	10746		6364	11806	9411	8226	10072	8100	6554	12701	12474	8093	10056		5490	13131	2377
8	8912	13405	5568	11089		10562	12161	9810	11643	10947	8855	7566	13230	12499	9363	10838		5497	13539	2933
9	8981	13606	5938	12027		11293	13061			11200	9575	8574			9825	13120		5667	15546	3026
10	9527	13935	7797	12048		11378	13101			12057	9948	8938			11657			5977	16062	3531
11	10791	13959	10153	12081			13388			13562	10013	9298						6049	16106	3747
12	11076	14166	10505	12262			13984			13645	10325	10052						6203	16139	
13	15482	15123	10521	12334			14040				10407	10075						6323	16201	
14		15171	10966	12423			14055				11888	10283						6476	16680	
15			15550	12452			14096				11750	10375						7054	17513	
16				12756			14113				11828	10388						7368	17871	
17				12843							12871	10772						8440	18072	
18				14492								10791						8966		
19				15198								11101						9565		
20												12151						10660		
21												12891						10671		
22												13062						10621		
23																		10851		
24																		10866		
25																		10871		
26																		11077		
27																		11083		
28																		11406		
29																		12617		
30																		12690		
31																		13191		
32																				
Tq	15482	15171	15550	15198	13130	11378	14113	9810	11643	13645	12871	13062	13230	12499	11657	13120	12461	13191	18072	3747

Nilai angka paling bawah merupakan keterangan *failure truncated* yaitu waktu gagal yang terakhir diamati dan memiliki kisaran mulai dari 3747 *hmr* sampai 15550 *hmr*. Jumlah kegagalan minimum adalah 3 kegagalan dan maksimal adalah 31 kegagalan. Jika dilihat rata-rata usia sistem telah mendekati waktu standar overhaul yaitu 15000 *hmr*, maka perlu untuk memodelkan sistem agar dapat mengetahui waktu *optimum overhaul* sehingga dapat mengurangi biaya.

4.2.1. Pengolahan Data Model Power Law

Asumsi model yang dipakai adalah model Power Law yang telah diterapkan oleh Crow dalam *U.S Army Material Systems Analysis Activity (AMSAA)*¹. Asumsi ini dipakai diawal karena model ini sudah umum dipakai, selain itu jika terdapat perbaikan pada komponen tertentu dalam suatu sistem biasanya tidak merubah sistem menjadi baru namun mengembalikan sistem pada kondisi operasi semula. Pada model ini tingkat *restoration factor (RF)* sama dengan 0 atau nilai q pada model sama dengan 1 dimana terdapat hubungan nilai $RF = 1-q$. Pengolahan data dilakukan dengan menggunakan *software RGA 6* yang dikeluarkan oleh Reliasoft. Tujuan dalam model ini adalah mendapatkan parameter β , λ , dan nilai LKV. Hasil *RGA 6* tidak terdapat nilai LKV, untuk itu perlu diolah lagi dengan *Weibull ++7* dengan model GRP 2-parameter dimana nilai q dimasukkan dengan nilai 1. Jadi NHPP Power Law dalam *RGA 6* memiliki kesamaan dengan model GRP 2-parameter dalam *Weibull ++7*. Hal ini dapat terlihat dalam lampiran 1 untuk hasil *RGA 6* serta lampiran 2 dan 3 hasil *Weibull ++7*.

4.2.1.1. Analisis Keseluruhan Sistem

Pada tabel di bawah ini terdapat *analisis summary* dari hasil pengolahan data dengan *RGA 6*. Analisis ini menjelaskan rangkuman hasil semua *dump truck* menjadi satu sistem. Analisis ini hanya ada dalam model yang dihasilkan *RGA 6*. Tujuan analisis ini untuk melihat keadaan umum sistem-sistem yang kita teliti menjadi satu sistem.

Tabel 4.22 Analisis Summary Model Power Law

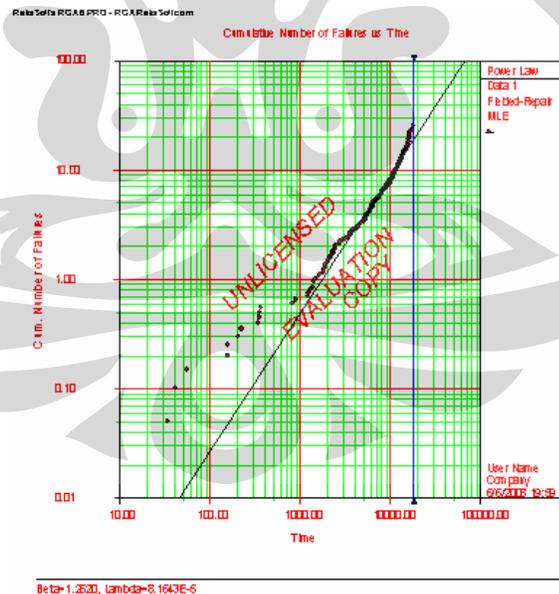
Analysis Summary					
Model:	Power Law			Analysis Method:	MLE
Beta:	1.262			Test Procedure:	Fielded-Repair
Lambda:	0.000081643			Input Type:	Cumulative
				Start Time:	0
				End Time:	18072
				Failures:	25,1308

(Sumber: *Software RGA 6*)

¹ Larry H. Crow. (1975). *Reliability Analysis for Complex, Repairable Systems*. Technical Report No.138, US Army Material Systems Analysis Activity, Aberdeen Proving Ground, Maryland.

Metode yang dipakai untuk analisis perhitungan adalah *maximum likelihood estimate* (MLE) dengan *failure truncated*. Dikatakan sebagai *failure truncated* karena pengamatan ini dilakukan sampai bilangan kegagalan tertentu. Estimasi dengan metode *maximum likelihood* adalah paling umum digunakan dalam *repairable systems* dan paling mudah mengerti. Lagipula keunggulan metode ini dapat sesuai dengan jumlah data yang minimal. Test *procedure* di sini adalah *fielded-repair* artinya uji yang dilakukan untuk *repairable systems*. *Input type* disini adalah kumulatif karena data yang diambil adalah data kumulatif. Setiap *dump truck* diuji dengan *start time* dari 0 hingga waktu kegagalan terakhir yang diamati. *End time* di sini adalah waktu kegagalan terakhir dari sistem yang diuji yaitu 18072 *hmr*. Waktu kegagalan ini adalah waktu terakhir dari *dump truck* jenis *DT 786* karena indikator *hourmeter* paling lama. Keseluruhan sistem memiliki nilai $\beta = 1.262$ dan $\lambda = 8.1643E-5$. Nilai $\beta > 1$, ini berarti rata-rata sistem *engine* yang teliti telah mengalami masa penurunan (*deterioration*).

a. Analisis Jumlah Kegagalan Terhadap Waktu

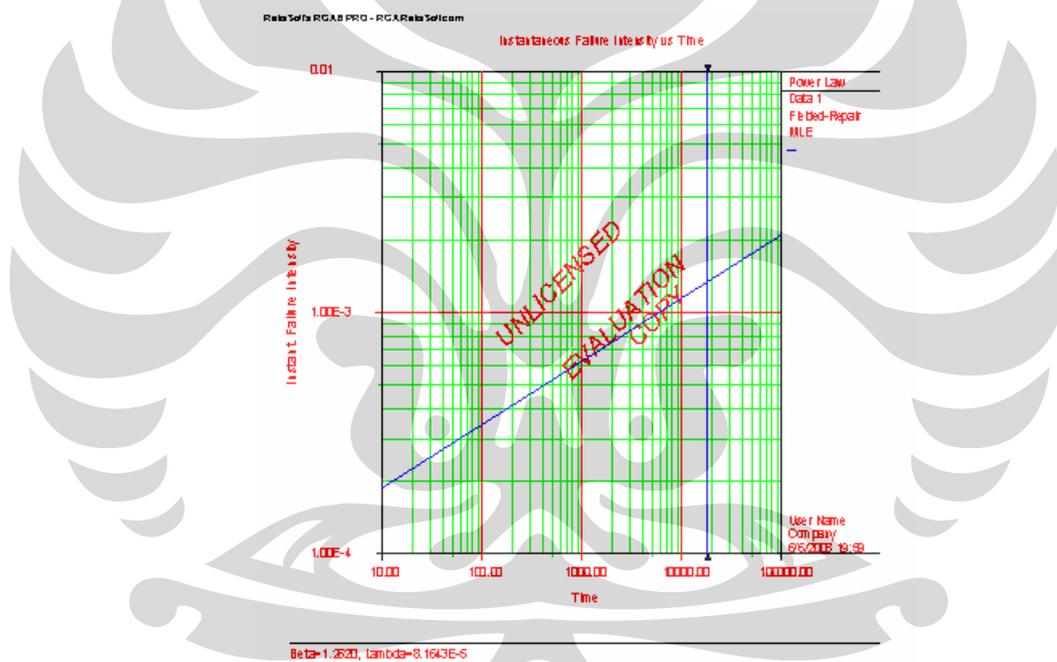


Gambar 4.4 Jumlah Kegagalan Versus Waktu

(Sumber: *Software RGA 6*)

Gambar di atas menggambarkan kumulatif jumlah kegagalan seiring bertambahnya waktu. Rata-rata kegagalan pada sistem akan mengalami kegagalan pertama kalinya (*time to first failure*) adalah pada waktu >1000 *hourmeter*. Garis biru di atas menandakan batas waktu pengamatan dari sistem yang diteliti yaitu 18072 *hourmeter*. Maksimum kegagalan pada batas penelitian adalah kurang dari 50 kegagalan sedangkan keadaan aktualnya adalah 31 kegagalan. Dari gambar di bawah dapat terlihat bahwa modus kegagalan terjadi pada 5000 sampai 12000 *hourmeter*.

b. Analisis *Instantaneous Failure Intensity* Terhadap Waktu



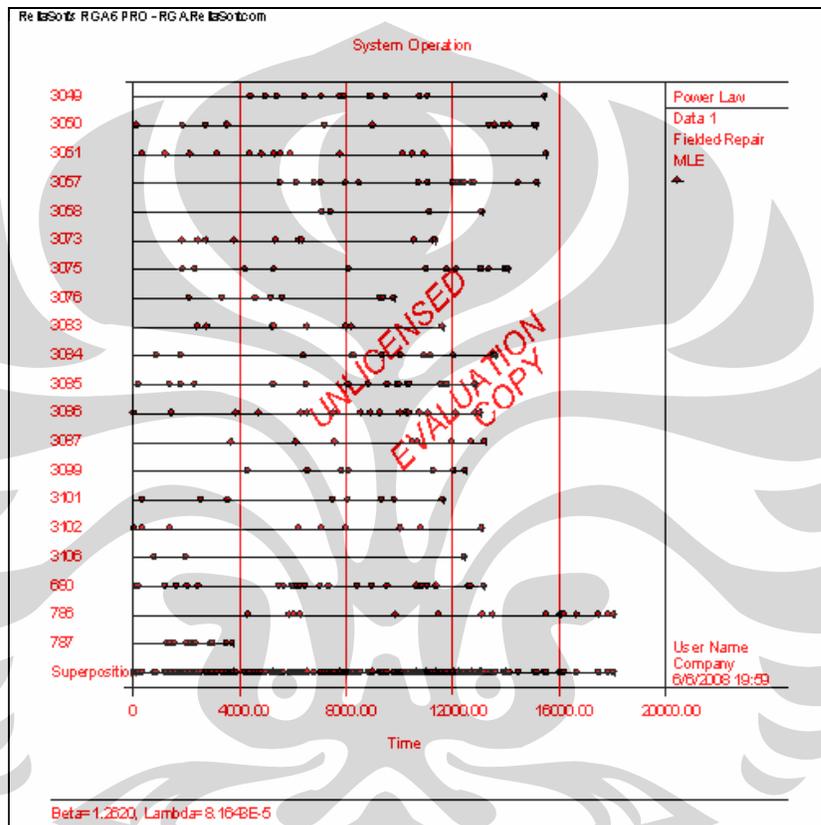
Gambar 4.5 *Instantaneous Failure Intensity* Versus Waktu

(Sumber: *Software RGA 6*)

Gambar di atas menjelaskan tentang keadaan intensitas kegagalan yang terjadi seketika itu juga berdasarkan waktu. Secara umum intensitas kegagalan setiap saat meningkat seiring bertambahnya waktu. Ini berarti sistem sedang mengalami masa *deterioration* (kemunduran), hal ini didukung pula dengan nilai $\beta > 1$, yaitu 1.262. Kecepatan intensitas kegagalan $u(t)$ terhadap waktu meningkat

dari $1.00E-4$ menjadi lebih dari $1.00E-3$. Hal ini menandakan sistem semakin cepat mengalami kegagalan. Untuk itu perlu adanya *maintenance* yang baik dan tindakan korektif dalam mencegah terjadinya kegagalan yang lebih besar.

c. Analisis *Plotting* Kegagalan



Gambar 4.6 *Plotting* Kegagalan

(Sumber: *Software* RGA 6)

Gambar 4.6 menjelaskan gambaran plot waktu dari setiap kegagalan yang terjadi. Dari gambar tersebut kita dapat melihat bagaimana pola waktu antara kegagalan terjadi, apakah rapat atau renggang pada waktu tertentu. Setiap sistem memiliki pola sendiri, kegagalan yang terjadi saling bergantung dan secara statistik tidak identik saling membagikan maka sistem ini tidak mengikuti pola *s.i.i.d* (*statistically independent and identically distributed*). Karena alasan inilah maka asumsi menggunakan sebaran atau distribusi tertentu tidak sesuai untuk menganalisis sistem yang dapat diperbaiki.

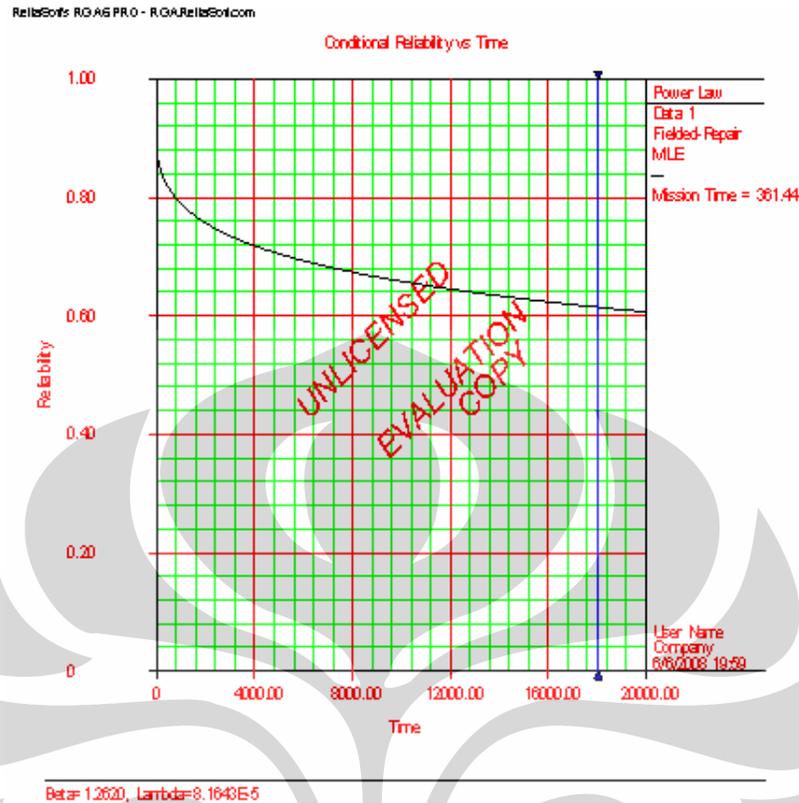
Dump truck yang memiliki waktu pengamatan paling kecil adalah DT 787, jika dilihat pada *hourmeter* sebenarnya kegagalan dimulai pada 15183 dan terakhir diamati pada 17625. Waktu kegagalan pertama kali sangat besar karena sebenarnya telah mengalami *overhaul* pada 15000 *hourmeter* sehingga perhitungan dimulai dari 0 lagi yaitu *hourmeter* 15000 merupakan titik awal = 0 untuk sistem yang telah diperbaiki berikutnya. Jadi sebenarnya kegagalan pertamakali DT 787 adalah 183 *hmr*. Jangkauannya paling kecil yaitu kurang dari 4000 *hmr* jika dibandingkan yang lain.

Kegagalan yang dimulai lebih dari 4000 *hmr* adalah DT 3049, DT 3057, DT 3058, DT 3099, DT 786 dan semuanya memiliki nilai $\beta > 1$. Sistem yang telah melampaui 16000 *hourmeter* adalah DT 786 dan sistem ini telah menunjukkan kegagalan yang makin banyak seiring pertambahan waktu. Yang memiliki kegagalan paling sedikit adalah DT 3106 dan kegagalan terjadi hanya di awal dan akhir pengamatan sehingga pada waktu antara 4000 sampai 12000 *hmr* tidak terjadi kegagalan. Jika gambar diperbesar maka dapat terlihat akumulasi kegagalan paling banyak dari semua sistem terjadi pada 12000 *hmr* sedangkan selebihnya tidak karena hanya beberapa sistem yang berumur lebih dari 12000 *hmr*.

d. Analisis Fungsi Reliabilitas Terhadap Waktu

Gambar di bawah menggambarkan fungsi reliabilitas terhadap waktu. Fungsi reliabilitas ini semakin turun seiring berjalan waktu. Reliabilitas disini berarti kemampuan sistem dalam menjalankan fungsinya pada waktu dan keadaan tertentu. Nilai reliabilitas berkisar dari 0 sampai 1. awalnya sistem akan memiliki reliabilitas = 1 atau 100% dan semakin lama akan semakin turun karena pemakaian. Secara keseluruhan sistem gabungan ini memiliki nilai reliabilitas 0.6 atau 60 % pada 20000 *hourmeter*.

Penurunan paling tajam terjadi ketika diawal yaitu pada *hmr* kurang dari 4000, ini dapat terlihat dari gradien garis yang curam. Semakin lama perubahan semakin landai terutama semenjak *hmr* lebih dari 8000 *hmr* dan perubahan mulai meningkat atau agak curam setelah 16000 *hmr*.



Gambar 4.7 Reliability Versus Waktu

(Sumber: Software RGA 6)

Ini menandakan idealnya pada *hourmeter* lebih dari 16000 sebaiknya sistem di-*overhaul* agar nilai reliabilitas tidak jauh melampaui standar keberhasilan proses.

4.2.1.2. Analisis Model Power Law

Dalam tabel di bawah ini dijelaskan mengenai parameter-parameter yang dihasilkan dengan model Power Law. N adalah jumlah kegagalan setiap *engine*. Parameter β mempengaruhi bagaimana sistem memperburuk (*deteriorates*) atau berkembang (*improves*) dalam waktu. Jika $\beta > 1$, berarti fungsi intensitas $u(t)$ meningkat sehingga kegagalan cenderung terjadi semakin sering. Jika $\beta < 1$, berarti fungsi intensitas $u(t)$ menurun sehingga sistem berkembang. Dan jika $\beta = 1$, power law mereduksi menjadi *homogeneous poisson process* yang sederhana dimana nilai fungsi intensitas menjadi sama dengan nilai parameter skala λ . Jadi jika nilai $\beta = 1$, maka fungsi intensitas $[u(t)] = \lambda$.

Tabel 4.23 Hasil Model Power Law

Jenis DT	DT3049	DT3050	DT3051	DT3057	DT3058	DT3073	DT3075
N	13	14	15	19	4	10	16
Beta	1.491096	1.076587	0.852329	2.613351	2.977711	1.272771	2.179155
Lambda	7.35E-06	0.000441	0.004012	2.24E-10	2.18E-12	6.88E-05	1.45E-08
Intensitas [u(t)]	0.001252	0.000993	0.000822	0.003267	0.000907	0.001119	0.002471
Overhaul Cost (\$)	55000	55000	55000	55000	55000	55000	55000
Maintenance Cost(\$)	353.9069	166.95	629.5847	468.3516	39.025	823.423	1714.705
To Overhaul	131701	3101324	#NUM!	25409.12	74842.15	140390.9	18004.72
Jenis DT	DT3076	DT3083	DT3084	DT3085	DT3086	DT3087	DT3099
N	8	8	12	17	22	8	8
Beta	1.726228	1.363899	1.553065	1.226555	1.04495	2.520103	2.92168
Lambda	1.03E-06	2.28E-05	4.54E-06	0.000155	0.0011	3.28E-10	8.58E-12
Intensitas [u(t)]	0.001408	0.000937	0.001366	0.00162	0.00176	0.001524	0.00187
Overhaul Cost (\$)	55000	55000	55000	55000	55000	55000	55000
Maintenance Cost(\$)	1011.053	820.0088	590.8508	866.6947	867.3595	413.8488	3228.239
To Overhaul	35843.79	116150	74725.03	126391.7	700307.4	34171.91	12946.41
Jenis DT	DT3101	DT3102	DT3106	DT680	DT786	DT787	
N	10	9	3	31	17	11	
Beta	0.827461	0.663323	0.657843	1.144236	2.397329	2.005157	
Lambda	0.004316	0.0167	0.006066	0.000598	1.06E-09	7.51E-07	
Intensitas [u(t)]	0.00071	0.000455	0.000158	0.002689	0.002255	0.005887	
Overhaul Cost (\$)	55000	55000	55000	55000	55000	55000	
Maintenance Cost(\$)	1314.096	2337.374	314.7333	196.1674	411.2906	236.7927	
To Overhaul	#NUM!	#NUM!	#NUM!	490929.1	37157.7	17106.73	

Pada hasil tabel di atas terdapat tiga nilai To yang sangat menyimpang dari standar *overhaul*, yaitu pada DT 3050, DT 3086, dan DT 680. Untuk Dt 3050 nilai To = 3,101,324 *hmr* sementara standar yang ada 15,000 *hmr*, ini dapat terjadi karena nilai $\beta = 1.07$ mengindikasikan sistem masih dekat dengan keadaan konstan (stabil) selain itu faktor biaya rata-rata *maintenance* (C1) hanya \$166.95 tergolong sangat kecil untuk jumlah kegagalan yang sudah mencapai 14 kegagalan. Nilai To pada DT 3086 adalah 700,307 *hmr*, dengan nilai $\beta = 1.04$ tergolong masih kecil dan menandakan sistem masih stabil, selain itu jumlah kegagalan yang terjadi tergolong banyak yaitu 22 namun nilai β masih sangat kecil. Nilai To pada DT 680 adalah 490,929 *hmr*, jumlah kegagalan yang terjadi paling banyak yaitu 31 kegagalan tetapi nilai $\beta = 1.144$ masih tergolong kecil dan faktor biaya (C1) hanya \$196.16 tergolong sangat kecil, maka itu walaupun jumlah kegagalan terbanyak namun biaya dan nilai β masih tergolong sangat kecil nilai To menjadi sangat tinggi. Dapat disimpulkan nilai To berbanding terbalik dengan nilai β dan biaya (C1) dan tidak secara langsung berhubungan dengan jumlah kegagalan. Semakin besar nilai β dan λ maka nilai intensitas [u(t)]

semakin tinggi. Tanda kecepatan sistem *engine* dalam mengalami kegagalan semakin cepat dan *time between failure* yang semakin kecil diakibatkan karena meningkatnya intensitas *failure* pengaruh keausan pada sistem *engine*. Maka dengan mengetahui adanya fungsi intensitas ini kita dapat mengambil tindakan yang bijak dalam menerapkan kapan suatu *engine* harus di *overhaul* secara ekonomis. Waktu *optimum overhaul* (T_o) menurut tabel tidak keluar hasilnya hanya ada keterangan #NUM!, artinya bahwa sistem tersebut masih dalam fase perkembangan (moralitas bayi) karena nilai $\beta < 1$ sehingga tidak ada artinya untuk menghitung T_o sementara sistem belum mengalami fase penurunan.

Pada model NHPP Power law nilai β rata-rata yang dihitung secara manual adalah 1.625742, ini berarti sistem rata-rata sedang dalam fase penurunan (*deterioration*). Nilai waktu *optimum overhaul* (T_o) adalah 321,087.6 *hourmeter*. Bila dibandingkan dengan standar waktu overhaul 15,000 *hourmeter* maka angka T_o sangat jauh sekali dengan kenyataan. Ini bukan berarti model salah karena setiap kita menambahkan waktu kegagalan dalam perhitungan sebelum *overhaul* maka nilai β akan terus meningkat selain itu biaya akan semakin meningkat sehingga nilai T_o akan turun menuju nilai *overhaul* sebenarnya. Selain itu ini dapat terjadi karena terdapat dump truck yang mengalami penyimpangan nilai T_o yang sangat besar seperti yang telah dijelaskan sebelumnya.

4.2.1.3. Analisis *Cramér-von mises*

Selanjutnya dilakukan pengujian statistik dengan *cramér-von mises* untuk uji kesesuaian model. Sesuai dengan asumsi awal yang kita pakai adalah model Power Law maka uji yang paling sesuai dengan model ini adalah *cramér-von mises*.

Terdapat hipotesis nul untuk menguji apakah data sesuai dengan model Power Law. Asumsi hipotesis nul adalah:

H_0 : adalah model Power Law sesuai.

H_1 : adalah model Power Law tidak sesuai.

Tabel 4.24 Uji Statistik Model Power Law

NHPP POWER LAW MODEL (RGA 6)								
No	Jenis	CVM	Laplace Trend	CBH	Failures	Beta	OH (Hours)	Lambda
1	DT_3049	Failed	No Trend	Not Available	13	1.4911	131,700.97	7.354E-06
2	DT_3050	Failed	No Trend	Available	14	1.0766	3,101,324.28	0.0004
3	DT_3051	Passed	No Trend	Not Available	15	0.8523	#NUM!	0.004
4	DT_3057	Passed	Deteriorating	Not Available	19	2.6134	25,409.12	2.24E-10
5	DT_3058	Passed	Deteriorating	Not Available	4	2.9777	74,842.15	2.183E-12
6	DT_3073	Passed	No Trend	Not Available	10	1.2728	140,390.90	6.88E-05
7	DT_3075	Failed	Deteriorating	Not Available	16	2.1792	18,004.72	1.45E-08
8	DT_3076	Passed	No Trend	Not Available	8	1.7262	35,843.79	1.029E-06
9	DT_3083	Passed	No Trend	Not Available	8	1.3639	116,149.97	2.277E-05
10	DT_3084	Passed	Deteriorating	Not Available	12	1.5531	74,725.03	4.543E-06
11	DT_3085	Failed	No Trend	Not Available	17	1.2266	126391.716	0.0002
12	DT_3086	Failed	Deteriorating	Not Available	22	1.045	700307.3636	0.0011
13	DT_3087	Passed	Deteriorating	Not Available	8	2.5201	34171.90912	3.284E-10
14	DT_3099	Passed	Deteriorating	Not Available	8	2.9217	12946.40973	8.577E-12
15	DT_3101	Passed	No Trend	Not Available	10	0.8275	#NUM!	0.0043
16	DT_3102	Passed	No Trend	Not Available	9	0.6633	#NUM!	0.0167
17	DT_3106	Passed	No Trend	Not Available	3	0.6578	#NUM!	0.0061
18	DT_680	Failed	No Trend	Not Available	31	1.1442	490929.0856	0.0006
19	DT_786	Failed	Deteriorating	Not Available	17	2.3973	37157.70214	1.059E-09
20	DT_787	Passed	No Trend	Not Available	11	2.0052	17106.73141	7.509E-07

Dari tabel kolom CVM dijelaskan mengenai uji statistik dengan *Cramér-von mises*, hasilnya memiliki dua kemungkinan yaitu *failed* atau *passed*. Jika *passed* artinya menerima H_0 artinya model Power Law sesuai dengan data ini dan jika *failed* sebaliknya. Hasil di atas menyatakan 13 *dump truck* dari 20 mengalami *passed*, ini membuktikan model Power Law dapat dipakai. Di lain pihak model ini tidak sesuai untuk semua data karena masih terdapat 7 *dump truck* mengalami *failed*. Untuk itu perlu adanya model yang lebih bersifat universal dan dapat diterapkan dalam semua data.

Dalam model ini juga terdapat *Common Beta Hypothesis (CBH)* untuk mengindikasikan apakah *multiple systems* seharusnya di kombinasikan kedalam “*equivalent*” atau “*superposition*” untuk dianalisa. Jika *available* maka sistem tersebut dapat dianalisa dengan mengkombinasikan dalam *multiple systems*. Jika dilihat maka hanya satu jenis *dump truck* saja yang *available*, ini berarti dari data yang ada semua jenis *dump truck* tidak dapat disatukan menjadi satu sistem. Tersedia juga *laplace trend test* untuk mengindikasikan apakah reliabilitas sistem sedang berkembang (*improving*), menurun (*deteriorating*) atau konstan.

4.2.2. Pengolahan Data Model GRP I

Jika kita berasumsi bahwa reparasi secara parsial memperbaharui sistem dan itu bukanlah *as-bad-as-old* setelah reparasi, lalu model Power Law tidak

menjadi model yang paling sesuai untuk analisis maka *General Renewal Process (GRP)* bisa digunakan sebagai gantinya². Kijima³ mengembangkan model *imperfect repair (GRP)* dengan menggunakan pemikiran proses umur sebenarnya pada sistem *repairable*. Dalam model Kijima I dikatakan bahwa n perbaikan dapat menghilangkan kedatangan kerusakan hanya selama waktu antara $(n-1)$ dan n kegagalan. Untuk pengolahan data digunakan *software Weibull ++7* yang merupakan keluaran dari Reliasoft juga. Hasil pengolahan data dapat dilihat dalam lampiran 2. Pengolahan data ini dengan analisis *Parametric RGA (Reliability Growth Analysis)* dengan model GRP yang dibangun berdasarkan fungsi Power Law. Pertama model yang dipilih adalah dengan tipe I atau GRP I. Tujuan dalam model ini adalah mendapatkan parameter β , λ , q dan nilai LKV. Parameter q di sini bukan asumsi melainkan hasil perhitungan sehingga tidak ada uji statistik seperti *cramér-von mises*. Langkah pengerjaan telah dijelaskan dalam bab sebelumnya.

4.2.2.1. Analisis Hasil Model GRP I

Hasil pengolahan data dapat dilihat dalam lampiran 2. Sebagai rangkuman hasil model akan dijelaskan dalam tabel di bawah ini. Perbedaan dalam pengolahan data dengan model GRP dibanding model sebelumnya adalah nilai q yaitu derajat dari n perbaikan dimana $0 \leq q \leq 1$ dan umur sebenarnya dari sistem baru $V_0 = 0$. Kalau dalam model NHPP nilai $q = 1$ atau tingkat *restoration factor (RF)* = 0, maka dalam model GRP nilai q dicari sehingga nilai q memiliki kemungkinan $0 \leq q \leq 1$. Karena nilai q didapat dari hasil perhitungan dan bukan asumsi awal seperti model sebelumnya maka untuk model ini tidak terdapat uji kesesuaian model. Nilai $q = 1$ artinya tingkat *restoration factor (RF)* = 0, sistem adalah *as-bad-as-old* setelah reparasi, lalu model Power Law dan model GRP memiliki kesamaan karena nilai q sama. Ini berarti terdapat hubungan antara

² ReliaSoft Corporation. (2008). *Avoiding a Common Mistake in the Analysis of Repairable Systems*. Maret 10, 2008. Reliability Edge, Volume 7, Issue 1, Tucson, AZ. <http://www.reliasoft.com/newsletter/v7i1/index.htm>

³ Kijima, M. (1989). Some results for repairable systems with general repair. *Journal of Applied Probability*, 20, 851-859.

model NHPP Power Law dengan GRP yaitu jika nilai $q = 1$ maka kedua model ini menjadi sama dalam nilai parameter yang dihasilkan.

Tabel 4.25 Hasil Model GRP I

Jenis DT	DT3049	DT3050	DT3051	DT3057	DT3058	DT3073	DT3075
N	13	14	15	19	4	10	16
Beta	1.491096	0.698802	0.852329	2.613351	3.039559	1.272771	2.263716
T [^] beta	1767802	835.0266	3738.796	8.48E+10	3.29E+12	145359.8	2.47E+09
Lambda	7.35E-06	0.00899	0.00401	2.24E-10	2.18E-12	6.88E-05	1.45E-08
LKV	-104.16	-110.407	-118.954	-139.483	-34.497	-80.0997	-120.342
q	1	0.000401	1	1	0.644925	1	0.462158
Overhaul Cost (\$)	55000	55000	55000	55000	55000	55000	55000
Maintenance Cost(\$)	353.9069	166.95	629.5847	468.3516	39.025	823.423	1714.705
To Overhaul	131746.2	#NUM!	#NUM!	25409.83	58988.5	140382.6	12110.92

Jenis DT	DT3076	DT3083	DT3084	DT3085	DT3086	DT3087	DT3099
N	8	8	12	17	22	8	8
Beta	1.77287	1.363899	1.553065	1.439289	0.771441	2.688086	3.029724
T [^] beta	11931954	351320.3	2641702	822089.8	1497.125	1.2E+11	2.58E+12
Lambda	9.55E-07	2.28E-05	4.54E-06	3.63E-05	0.00815	3.28E-10	8.58E-12
LKV	-63.8074	-65.9158	-95.4252	-129.091	-161.543	-63.541	-63.0755
q	0.522282	1	1	0.170923	0.000608	0.279562	0.524604
Overhaul Cost (\$)	55000	55000	55000	55000	55000	55000	55000
Maintenance Cost(\$)	1011.053	820.0088	590.8508	866.6947	867.3595	413.8488	3228.239
To Overhaul	27397.25	116042.6	74751.8	38502.29	#NUM!	17123.37	9070.112

Jenis DT	DT3101	DT3102	DT3106	DT680	DT786	DT787
N	10	9	3	31	17	11
Beta	0.698737	0.663323	0.657843	0.735874	2.457924	2.005157
T [^] beta	694.1866	538.9124	494.5736	1076.483	2.91E+10	14648636
Lambda	0.00883	0.0167	0.00607	0.0134	1.06E-09	7.51E-07
LKV	-80.0474	-73.6884	-27.6912	-216.091	-130.36	-73.0002
q	0.0144	1	1	0.00007	0.626429	1
Overhaul Cost (\$)	55000	55000	55000	55000	55000	55000
Maintenance Cost(\$)	1314.096	2337.374	314.7333	196.1674	411.2906	236.7927
To Overhaul	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	28168.26	17105.86

Dalam model ini terdapat nilai *LKV* (*Likelihood Value*) merupakan indikator untuk menunjukkan seberapa bagus model sesuai dengan data kita. Semakin positif maka model ini semakin bagus. Nilai ini akan berguna jika kita membandingkan beberapa model yang akan diuji mana yang terbaik. Nilai *LKV* hanya keluar dalam Weibull ++7.

Penyimpangan nilai *To* dengan standar waktu overhaul tidak sebesar pada model sebelumnya. Untuk model sebelumnya yang mengalami nilai *To* tertinggi, ternyata di model GRP 1 ketiganya memiliki $\beta < 1$, maka dari itu nilai *To* tidak muncul dalam model ini. Penyimpangan terbesar terjadi pada DT 3073 dengan nilai *To* = \$ 140,382 didukung dengan nilai $\beta = 1.2727$, nilainya terkecil

dibandingkan dengan sistem yang memiliki nilai $\beta > 1$. Pada model GRP I nilai β rata-rata adalah 1.603443 dan nilai rata-rata waktu *optimum overhaul* (T_o) adalah 53,599.97.

4.2.2.2. Analisis Perbandingan Model GRP I dengan NHPP Power Law

Beberapa *dump truck* yang mengalami perubahan nilai β dengan model NHPP sebelumnya, antara lain:

1. DT 3050: β turun, dari 1.076 menjadi 0.6988.
2. DT 3058: β naik, dari 2.9777 menjadi 3.0395.
3. DT 3075: β naik, dari 2.179 menjadi 2.264.
4. DT 3076: β naik, dari 1.7262 menjadi 1.7728.
5. DT 3085: β naik, dari 1.226 menjadi 1.439.
6. DT 3086: β turun, dari 1.044 menjadi 0.7714.
7. DT 3087: β naik, dari 2.520 menjadi 2.688.
8. DT 3099: β naik, dari 2.9217 menjadi 3.029.
9. DT 3101: β turun, dari 0.827 menjadi 0.698.
10. DT 680: β turun, dari 1.1442 menjadi 0.7358.
11. DT 786: β naik, dari 2.397 menjadi 2.458.

Perubahan terbanyak adalah kenaikan nilai β namun rata-rata β turun pada model ini jika dibanding dengan model NHPP. Ini dapat terjadi karena jumlah akumulasi kenaikan lebih kecil dibanding dengan jumlah akumulasi penurunan, akibatnya nilai rata-rata β turun. Jika nilai rata-rata β turun seharusnya nilai waktu *optimum overhaul* lebih besar dari sebelumnya. Ternyata nilai waktu *optimum overhaul* (T_o) pada model Power Law adalah 321,087.6 *hourmeter* sedangkan nilai T_o pada model GRP I adalah 53,599.97 *hourmeter*. Ini dapat terjadi karena setiap penurunan nilai β menunjukkan nilai $\beta < 1$, artinya penurunan nilai β tidak berpengaruh terhadap nilai T_o karena untuk nilai $\beta < 1$ nilai tidak akan muncul atau #NUM! pada perhitungan. Sedangkan setiap kenaikan nilai β menyebabkan nilai T_o yang semakin kecil sehingga nilai rata-rata T_o pada akhirnya turun menuju waktu *overhaul* sebenarnya. Jika dilihat nilai $T_o = 53,599.97$ *hourmeter* maka model ini lebih mendekati waktu standar aktual *overhaul* 15,000 *hourmeter*.

4.2.3. Pengolahan Data Model GRP II

Dalam model Kijima I dikatakan bahwa n perbaikan dapat menghilangkan kedatangan kerusakan hanya selama waktu antara $(n-1)$ dan n kegagalan. Pada prakteknya n perbaikan tidak hanya tergantung pada $(n-1)$ perbaikan tetapi dapat bergantung pada semua perbaikan sebelumnya. Kita berasumsi bahwa tindakan perbaikan dapat menghilangkan semua akumulasi kerusakan pada n kegagalan yang dikembangkan menjadi model Kijima II atau GRP II.

4.2.3.1. Analisis Hasil Model GRP II

Tabel 4.26 Hasil Model GRP II

	DT3049	DT3050	DT3051	DT3057	DT3058	DT3073	DT3075
N	13	14	15	19	4	10	16
Beta	1.763235	0.657714	0.852329	2.646788	3.083116	1.641418	2.179155
T[^] beta	24414604	562.2261	3738.796	1.17E+11	4.98E+12	4546724	1.1E+09
Lambda	8.45E-07	0.0127	0.00401	2.24E-10	2.18E-12	3.85E-06	1.45E-08
LKV GRP 2	-103.624	-110.263	-118.954	-139.119	-33.9406	-79.6842	-120.711
q GRP2	0.865697	0.023	1	0.972928	0.662783	0.634575	1
Overhaul Cost (\$)	55000	55000	55000	55000	55000	55000	55000
Maintenance Cost(\$)	353.9069	166.95	629.5847	468.3516	39.025	823.423	1714.705
To Overhaul	56720.34	#NUM!	#NUM!	22181.25	50163.78	33719.2	18006.43

	DT3076	DT3083	DT3084	DT3085	DT3086	DT3087	DT3099
N	8	8	12	17	22	8	8
Beta	1.726228	1.808916	1.553065	1.226555	0.531828	2.57205	2.955729
T[^] beta	7771967	22655245	2641702	109816.3	154.5293	3.99E+10	1.29E+12
Lambda	1.03E-06	8.81E-07	4.54E-06	0.000155	0.0717	3.28E-10	8.58E-12
LKV GRP 2	-63.8918	-64.8478	-96.4252	-129.37	-160.033	-64.5136	-63.4517
q GRP2	1	0.510886	1	1	0.434977	0.872824	0.933694
Overhaul Cost (\$)	55000	55000	55000	55000	55000	55000	55000
Avg. Maintenance Cost(\$)	1011.053	820.0088	590.8508	866.6947	867.3595	413.8488	3228.239
To Overhaul	35830.49	25584.7	74751.8	126261.4	#NUM!	27328.11	11538.4

	DT3101	DT3102	DT3106	DT680	DT786	DT787
N	10	9	3	31	17	11
Beta	0.773745	0.662785	0.657843	0.744144	2.397329	2.075284
T[^] beta	1401.209	536.1748	494.5736	1164.341	1.6E+10	26086007
Lambda	0.00467	0.0168	0.00607	0.012671	1.06E-09	8.61E-07
LKV GRP 2	-80.1257	-73.6884	-27.6912	-216.127	-130.516	-72.2895
q GRP2	0.00124	1	1	0.000233	1	0.817935
Overhaul Cost (\$)	55000	55000	55000	55000	55000	55000
Avg. Maintenance Cost(\$)	1314.096	2337.374	314.7333	196.1674	411.2906	236.7927
To Overhaul	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	37146.91	11152.78

Secara konsep model ini tidak jauh berbeda dengan model GRP I dimana nilai q yaitu derajat dari n perbaikan dimana $0 \leq q \leq 1$. Pada model GRP II

analisis yang digunakan pun dengan metode *maximum likelihood estimate (MLE)*. Untuk perumusan model ini dapat dilihat secara jelas dalam dasar teori. Dalam model ini nilai $q = 1$ juga berarti sistem *as bad as old* dan model NHPP Power Law memiliki nilai parameter yang sama dengan model ini. Dalam analisis dengan *Parametric RGA (Reliability Growth Analysis)*, untuk model GRP II dan I sebelumnya digunakan parameter-3. Artinya hasil keluaran model berupa 3 parameter yaitu β , λ , dan q . Nilai LKV GRP II ini dapat menjadi pembandingan dengan model GRP I dalam menentukan model yang terbaik.

Penyimpangan terbesar terjadi pada DT 3085 dengan nilai $T_0 = \$ 126,261$ didukung dengan nilai $\beta = 1.2265$, nilainya terkecil dibandingkan dengan sistem yang memiliki nilai $\beta > 1$. Pada model GRP II nilai β rata-rata adalah 1.625463 dan nilai rata-rata waktu *optimum overhaul (To)* adalah 40,798.89.

4.2.3.2. Analisis Perbandingan Model GRP II dengan NHPP Power Law

Beberapa *dump truck* yang mengalami perubahan nilai β dengan model NHPP sebelumnya, antara lain:

1. DT 3049: β naik, dari 1.491 menjadi 1.76.
2. DT 3050: β turun, dari 1.0766 menjadi 0.6577.
3. DT 3057: β naik, dari 2.6133 menjadi 2.646.
4. DT 3058: β naik, dari 2.977 menjadi 3.083.
5. DT 3073: β naik, dari 1.2727 menjadi 1.6414.
6. DT 3083: β naik, dari 1.3639 menjadi 1.8089.
7. DT 3086: β turun, dari 1.0449 menjadi 0.5318.
8. DT 3087: β naik, dari 2.5201 menjadi 2.572.
9. DT 3099: β naik, dari 2.9217 menjadi 2.9557.
10. DT 3101: β turun, dari 0.82746 menjadi 0.7737.
11. DT 680: β turun, dari 1.144 menjadi 0.744.
12. DT 787: β naik, dari 2.005 menjadi 2.075.

GRP II mirip GRP I dimana perubahan didominasi kenaikan nilai β namun rata-rata β turun pada model ini jika dibanding dengan model NHPP tetapi naik jika dibanding dengan GRP I. Ini dapat terjadi karena jumlah akumulasi kenaikan lebih kecil dibanding dengan jumlah akumulasi penurunan, akibatnya nilai rata-

rata β turun jika dibanding dengan NHPP. Jika nilai rata-rata β turun seharusnya nilai waktu *optimum overhaul* lebih besar dari NHPP. Ini dapat terjadi karena setiap penurunan nilai β menunjukkan nilai $\beta < 1$, artinya penurunan nilai β tidak berpengaruh terhadap nilai T_0 karena untuk nilai $\beta < 1$ nilai tidak akan muncul atau #NUM! pada perhitungan. Sedangkan setiap kenaikan nilai β menyebabkan nilai T_0 yang semakin kecil sehingga nilai rata-rata T_0 pada akhirnya turun menuju waktu *overhaul* sebenarnya. Nilai waktu *optimum overhaul* (T_0) pada model GRP I adalah 40,798.89 *hourmeter* dan nilai terkecil jika dibandingkan dengan kedua model sebelumnya. Jika dibandingkan dengan model GRP I nilai β lebih besar oleh karena itu nilai T_0 pada GRP II menjadi lebih kecil. Jika dilihat nilai $T_0 = 40,798.89$ *hourmeter* maka model ini lebih mendekati waktu standar aktual *overhaul* 15,000 *hourmeter* dibandingkan model GRP I.

4.3. Model Pilihan

Untuk menentukan model terbaik maka perlu ada indikator pembandingan dari semua model. Pemilihan model ini dimaksudkan untuk mendapat analisis yang paling tepat sehingga paling mendekati dengan aktual. Seperti yang dijelaskan sebelumnya bahwa nilai LKV merupakan *output* dari Weibull ++7. maka dari itu untuk membandingkan ketiga model perlu nilai LKV. Pada model NHPP Power Law yang dikeluarkan oleh RGA 6 tidak memiliki *output* nilai LKV karena itu perlu adanya penyetaraan atau agar bisa dibandingkan. Hal ini akan dijelaskan dalam penjelasan di bawah ini.

4.3.1. Perbandingan LKV

Nilai *LKV* (*Likelihood Value*) merupakan indikator untuk menunjukkan seberapa bagus model sesuai dengan data kita. Semakin positif maka model ini semakin bagus. Nilai ini akan berguna jika kita membandingkan beberapa model yang akan diuji mana yang terbaik. Nilai *LKV* hanya keluar dalam Weibull ++7, untuk itu maka kita memakai analisis *Parametric RGA* (*Reliability Growth Analysis*) dengan parameter-2. Parameter-2 ini mengindikasikan hasil keluaran model hanya 2 yaitu berupa nilai β dan λ sedangkan untuk parameter q ($1-RF$) sudah di-set diawal dengan mengisi nilai q sesuai asumsi kita. Kita menggunakan

parameter-2 dengan set nilai $q = 1$ agar kita mendapatkan nilai LKV bagi model NHPP Power Law. Dengan set nilai $q = 1$, ini berarti kita telah berasumsi sistem *as bad as old*. Semua hasil nilai GRP parameter-2 dengan $q = 1$ memiliki nilai β dan λ yang sama dengan model Power Law hasil RGA 6. Hasil pengolahan data dengan analisis *Parametric RGA (Reliability Growth Analysis)* parameter-2 terdapat dalam lampiran 2 dan 3. Dalam lampiran tersebut ditampilkan hasil dengan 2 tipe, yaitu tipe I dan II. Ternyata hasil dari kedua tipe yang berbeda tidak menyebabkan hasil yang beda karena nilai q masing-masing tipe adalah sama sehingga tidak ada pengaruh jika kita memilih tipe I atau II pada kondisi seperti ini. Lain halnya dengan GRP parameter -3 dimana nilai q merupakan parameter yang kita cari sehingga perbedaan tipe dapat membuat hasil berbeda karena nilai q yang dihasilkan berbeda kecuali jika nilai q yang dihasilkan sama-sama bernilai 1. Di bawah ini terdapat tabel yang menunjukkan nilai LKV dari masing-masing model.

Tabel 4.27 Perbandingan LKV

	LKV GRP II	LKV GRP I	LKV NHPP	Model Terpilih
DT3049	-103.62441	-104.16022	-104.16022	GRP II
DT3050	-110.26298	-110.4066	-111.79597	GRP II
DT3051	-118.95439	-118.95439	-118.95439	Semua
DT3057	-139.11927	-139.48273	-139.48273	GRP II
DT3058	-33.940557	-34.496989	-34.677509	GRP II
DT3073	-79.684165	-80.099681	-80.099681	GRP II
DT3075	-120.71092	-120.34168	-120.71092	GRP I
DT3076	-63.891837	-63.807389	-63.891837	GRP I
DT3083	-64.847782	-65.915833	-65.915833	GRP II
DT3084	-95.425239	-95.425239	-95.425239	Semua
DT3085	-129.3703	-129.09116	-129.3703	GRP I
DT3086	-160.03292	-161.54265	-162.48028	GRP II
DT3087	-64.513635	-63.54096	-64.717534	GRP I
DT3099	-63.451715	-63.075485	-63.516278	GRP I
DT3101	-80.125679	-80.047359	-80.419542	GRP I
DT3102	-73.6884	-73.6884	-73.6884	Semua
DT3106	-27.691249	-27.691249	-27.691249	Semua
DT680	-216.12711	-216.09059	-218.38322	GRP I
DT786	-130.51613	-130.35959	-130.51613	GRP I
DT787	-72.289486	-73.00017	-73.00017	GRP II

Dalam pemilihan model yang terbaik maka yang dilihat adalah nilai LKV yang paling positif. Nilai LKV di atas memiliki nilai negatif semua, maka yang dipilih adalah nilai yang paling kecil karena paling mendekati 0 positif.

4.3.2. Analisis Model Terpilih

Model GRP I dan II memiliki komposisi sama sebagai model yang terpilih. Dengan hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa model GRP merupakan model yang terbaik karena paling sesuai dan universal bagi semua data. Selain itu model GRP tidak memerlukan uji statistik karena model ini secara otomatis mengemas dengan tipe data melalui nilai q . Untuk model yang terpilih semua artinya nilai q pada kedua model GRP sama yaitu 1 sehingga nilai parameter β dan λ sama untuk semua model.

Tabel 4.28 Perbandingan Model NHPP dan Terpilih

NHPP POWER LAW MODEL (RGA 6)										CHOICE MODEL				
No	Jenis	CVM	Laplace Trend	CBH	Failures	Beta	OH (Hours)	Lambda	LKV	Choice Model	LKV	Beta	Lambda	q
1	DT_3049	Failed	No Trend	Not Available	13	1.4911	131,700.97	7.4E-06	-104.160225	GRP II	-103.62	1.7632	8.45E-07	0.8657
2	DT_3050	Failed	No Trend	Available	14	1.0766	3,101,324.28	0.0004	-111.795971	GRP II	-110.26	0.6577	1.27E-02	0.02
3	DT_3051	Passed	No Trend	Not Available	15	0.8523	#NUM!	0.004	-118.954387	Semua	-118.95	0.8523	0.004	1
4	DT_3057	Passed	Deteriorating	Not Available	19	2.6134	25,409.12	2.2E-10	-139.482733	GRP II	-139.12	2.6468	2.24E-10	0.97293
5	DT_3058	Passed	Deteriorating	Not Available	4	2.9777	74,842.15	2.2E-12	-34.677509	GRP II	-33.941	3.0631	2.18E-12	0.66278
6	DT_3073	Passed	No Trend	Not Available	10	1.2726	140,990.90	6.9E-05	-80.099681	GRP II	-79.684	1.6414	3.85E-06	0.63458
7	DT_3075	Failed	Deteriorating	Not Available	16	2.1792	18,004.72	1.5E-08	-120.710918	GRP I	-120.34	2.2637	1.45E-08	0.46216
8	DT_3076	Passed	No Trend	Not Available	8	1.7262	35,843.79	1E-06	-63.8918366	GRP I	-63.807	1.7729	9.55E-07	0.52226
9	DT_3083	Passed	No Trend	Not Available	8	1.3639	116,149.97	2.3E-05	-65.9158335	GRP II	-64.848	1.8089	8.81E-07	0.51089
10	DT_3084	Passed	Deteriorating	Not Available	12	1.5531	74,725.03	4.5E-06	-95.4252392	Semua	-95.425	1.5531	4.54E-06	1
11	DT_3085	Failed	No Trend	Not Available	17	1.2266	126391.716	0.0002	-129.370299	GRP I	-129.09	1.4393	3.63E-05	0.17092
12	DT_3086	Failed	Deteriorating	Not Available	22	1.045	700307.3636	0.0011	-162.480284	GRP II	-160.03	0.5318	7.17E-02	0.43498
13	DT_3087	Passed	Deteriorating	Not Available	8	2.5201	34171.90912	3.3E-10	-64.7175344	GRP I	-63.541	2.6881	3.28E-10	0.27956
14	DT_3099	Passed	Deteriorating	Not Available	8	2.9217	12946.40973	8.6E-12	-63.5162779	GRP I	-63.075	3.0297	8.58E-12	0.5246
15	DT_3101	Passed	No Trend	Not Available	10	0.8275	#NUM!	0.0043	-80.4195424	GRP I	-80.447	0.6987	8.83E-03	0.01
16	DT_3102	Passed	No Trend	Not Available	9	0.6633	#NUM!	0.0167	-73.6883925	Semua	-73.688	0.663	0.0168	1
17	DT_3106	Passed	No Trend	Not Available	3	0.6578	#NUM!	0.0061	-27.6912487	Semua	-27.691	0.6578	0.0061	1
18	DT_680	Failed	No Trend	Not Available	31	1.1442	490929.0856	0.0006	-218.383222	GRP I	-216.03	0.7359	1.34E-02	7.0E-05
19	DT_786	Failed	Deteriorating	Not Available	17	2.3973	37157.70214	1.1E-09	-130.516133	GRP I	-130.36	2.4579	1.06E-09	0.62843
20	DT_787	Passed	No Trend	Not Available	11	2.0052	17106.73141	7.5E-07	-73.0001698	GRP II	-72.289	2.0753	8.61E-07	0.81794

Dari tabel dapat dilihat setiap jenis *dump truck* yang diberi warna kuning adalah sistem yang tidak sesuai dengan Power Law karena *CVM (Cramér-von mises) failed*. Ternyata jika *CVM failed* model yang dipilih adalah model GRP I atau II bukan semua model. Kata “Semua” pada kolom “Choice Model” artinya semua model sesuai, dalam hal ini Power Law memang sesuai dengan *CVM passed*. Maka dapat disimpulkan bahwa GRP adalah model terbaik untuk *repairable systems*.

4.3.3. Analisis Parameter Model Terpilih

Setelah menemukan model yang paling sesuai berdasarkan nilai LKV maka dilakukan analisa mengenai parameter-parameter yang dihasilkan. Di bawah ini terdapat rangkuman parameter dari model yang dipilih. Parameter yang dihasilkan adalah nilai β dan λ sebagai *input* data untuk menentukan nilai T_o (waktu *optimum overhaul*).

Tabel 4.29 Parameter Model Terpilih

CHOICE MODEL				
Choice Model	LKV	Beta	Lambda	q
GRP II	-103.62	1.7632	8.45E-07	0.8657
GRP II	-110.26	0.6577	1.27E-02	0.02
Semua	-118.95	0.8523	0.004	1
GRP II	-139.12	2.6468	2.24E-10	0.9729
GRP II	-33.941	3.0831	2.18E-12	0.6628
GRP II	-79.684	1.6414	3.85E-06	0.6346
GRP I	-120.34	2.2637	1.45E-08	0.4622
GRP I	-63.807	1.7729	9.55E-07	0.5223
GRP II	-64.848	1.8089	8.81E-07	0.5109
Semua	-95.425	1.5531	4.54E-06	1
GRP I	-129.09	1.4393	3.63E-05	0.1709
GRP II	-160.03	0.5318	7.17E-02	0.435
GRP I	-63.541	2.6881	3.28E-10	0.2796
GRP I	-63.075	3.0297	8.58E-12	0.5246
GRP I	-80.047	0.6987	8.83E-03	0.01
Semua	-73.688	0.663	0.0168	1
Semua	-27.691	0.6578	0.0061	1
GRP I	-216.09	0.7359	1.34E-02	7.0E-05
GRP I	-130.36	2.4579	1.06E-09	0.6264
GRP II	-72.289	2.0753	8.61E-07	0.8179

Pada tabel di atas nilai β rata-rata > 1 yaitu 1.6510253 maka secara umum sistem sedang mengalami masa penurunan (*deterioration*) dan perlu dilakukan analisis waktu *optimum overhaul* agar dapat mengurangi biaya. Nilai β berkisar antara $0.5318284 \leq \beta \leq 3.0831163$ sedangkan nilai λ berkisar antara $2.18E-12 \leq \lambda \leq 0.0717$. Dari data tersebut terdapat 7 *dump truck* yang masih dalam fase perkembangan (*mortalitas bayi*) dengan nilai $\beta < 1$ sehingga tidak perlu melakukan analisis waktu *optimum overhaul*. Dari model terpilih terdapat 4 jenis *dump truck* yang memiliki nilai q sama dengan 1, ini berarti pada sistem ini ketiga model sesuai. Secara umum model yang paling banyak dipilih adalah model GRP.

4.4. Analisis Waktu *Optimum Overhaul* (T_o)

Setelah memilih model yang sesuai dan mengetahui parameter-parameter yang dihasilkan maka selanjutnya dengan rumus T_o (persamaan 4.1) di bawah ini kita dapat menghitung waktu *optimum overhaul*. Untuk menghitung ini maka *input* data di dapat dari perhitungan sebelumnya. Nilai C_1 (*average maintenance cost*) didapat dari pengolahan data awal WO sedangkan C_2 adalah biaya *overhaul*

yang sama nilainya untuk semua *dump truck*. Nilai β dan λ didapat dari *output* model yang dipilih dan terdapat berasal dari tabel 4.28.

$$\hat{T}_o = \left[\frac{C_2}{\lambda(\hat{\beta} - 1)C_1} \right]^{1/\hat{\beta}} \quad (4.1)$$

Tabel 4.30 Parameter Waktu *Optimum Overhaul* (T_o)

Beta (β)	Lambda (λ)	C1	C2	T_o	T_q	$\Delta T_o - T_q$
1.76323	8.45E-07	353.9069231	55000	56720	15482	41238.3
0.65771	1.27E-02	166.95	55000	#NUM!	15171	#NUM!
0.8523	0.004	629.5846667	55000	#NUM!	15550	#NUM!
2.64679	2.24E-10	468.3515789	55000	22181	15198	6983.25
3.08312	2.18E-12	39.025	55000	50164	13130	37033.8
1.64142	3.85E-06	823.423	55000	33719	11378	22341.2
2.26372	1.45E-08	1714.705	55000	12111	14113	-2002.08
1.77287	9.55E-07	1011.0525	55000	27397	9810	17587.2
1.80892	8.81E-07	820.00875	55000	25585	11643	13941.7
1.5531	4.5425E-06	590.8508333	55000	74704	13645	61058.5
1.43929	3.63E-05	866.6947059	55000	38502	12871	25631.3
0.53183	7.17E-02	867.3595455	55000	#NUM!	13062	#NUM!
2.68809	3.28E-10	413.84875	55000	17123	13230	3893.37
3.02972	8.58E-12	3228.23875	55000	9070.1	12499	-3428.89
0.69874	8.83E-03	1314.096	55000	#NUM!	11657	#NUM!
0.663	0.0168	2337.374444	55000	#NUM!	13120	#NUM!
0.6578	0.0061	314.7333333	55000	#NUM!	12461	#NUM!
0.73587	1.34E-02	196.1674194	55000	#NUM!	13191	#NUM!
2.45792	1.06E-09	411.2905882	55000	28168	18072	10096.3
2.07528	8.61E-07	236.7927273	55000	11153	3747	7405.78

Nilai T_q (*failure truncated*) adalah waktu terakhir dari kegagalan yang terakhir diamati. Nilai selisih dari T_o dan T_q adalah selisih waktu yang masih tersisa (ketika nilainya positif) atau kelebihan (ketika nilainya negatif) untuk melakukan *overhaul*. Namun waktu selisih selalu berubah ketika kita memasukkan data waktu kegagalan lagi sehingga waktu ini dapat digunakan sebagai indikator persiapan komponen agar ketika terjadi *overhaul* selalu tersedia gantinya. Waktu selisih ini juga dapat menjadi acuan bagi perusahaan dalam menetapkan prioritas *engine dump truck* yang harus di *overhaul*. Tanda warna kuning menyatakan nilai minimal dari setiap parameter sedangkan warna biru menyatakan nilai maksimal.

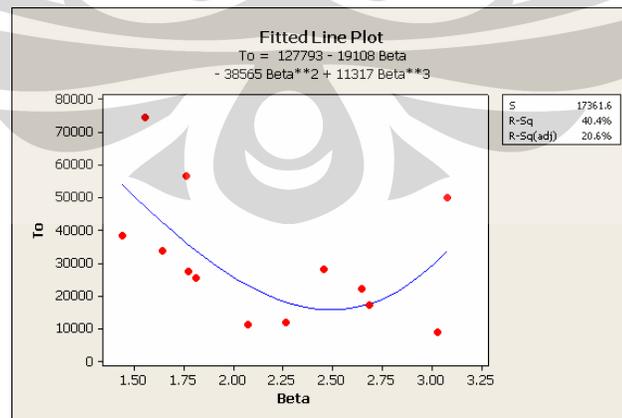
Tabel 4.31 Rangkuman Parameter

	Beta (β)	Lambda (λ)	C1	To
Maksimal	3.0831163	0.0717	3228.23875	74703
Minimal	0.5318284	2.18E-12	39.025	9070
Rata-rata	1.6510253	6.68E-03	840.222726	31277

Rangkuman untuk data input dan nilai T_o terdapat dalam tabel di atas. Untuk parameter β terbesar yaitu 3.083 ternyata nilai titik optimum *overhaul* masih tergolong tinggi yaitu 50163 *hmr*. Ini dapat terjadi karena parameter C1 (rata-rata biaya *maintenance*) nilainya terkecil yaitu \$ 39. Hal ini membuktikan bahwa faktor biaya sangat penting dalam analisis waktu *optimum overhaul*, untuk itu perlu adanya pencatatan yang teliti dan akurat agar analisis yang dihasilkan juga dapat merepresentasikan keadaan aktual. Untuk parameter C1 yang nilainya tertinggi yaitu \$ 3228 maka nilai waktu *optimum overhaul* sangat kecil sekali yaitu 9070 *hmr*, hal ini di dukung pula dengan parameter β yang bernilai cukup tinggi yaitu 3.029.

4.4.1. Analisis Waktu *Optimum Overhaul* (T_o) Terhadap Beta (β)

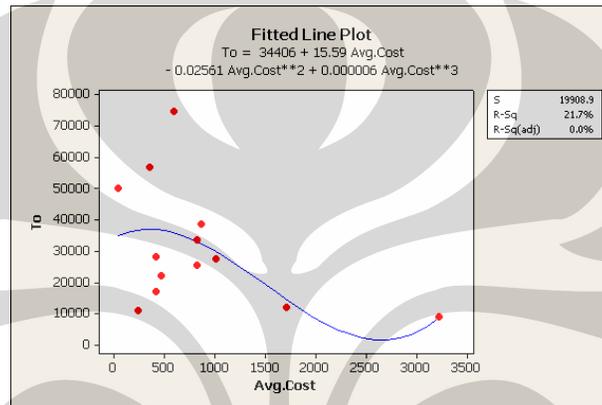
Rata-rata nilai β yang bernilai besar ($\beta > 2$) maka nilai waktu *optimum overhaul* adalah rendah. Ini berarti parameter yang paling berpengaruh adalah β karena jika kita lihat melalui rumus parameter ini merupakan parameter untuk akar pangkat β . Jadi jika nilai β semakin tinggi maka nilai akar juga semakin tinggi, artinya bahwa nilai yang berada dalam akar akan di bagi dengan bilangan yang semakin tinggi.



Gambar 4.8 Waktu *Optimum Overhaul* (T_o) Vs Beta (β)

Dari gambar di atas nilai β semakin besar maka nilai waktu *optimum overhaul* semakin kecil namun terdapat pengecualian untuk β tertinggi. Hal ini dapat terjadi karena nilai T_o tidak hanya bergantung pada nilai β saja tetapi juga faktor biaya. Ternyata sistem dengan β tertinggi memiliki biaya terendah yaitu hanya \$ 39 sehingga nilai T_o tidak menjadi paling rendah.

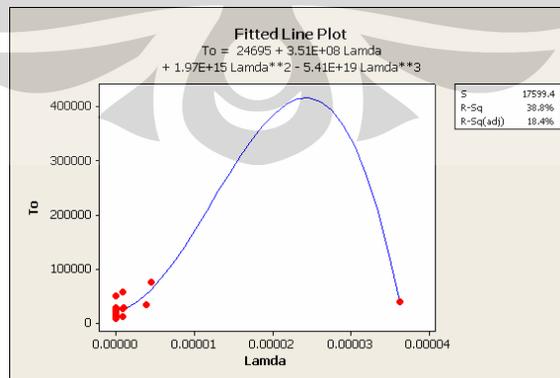
4.4.2. Analisis Waktu *Optimum Overhaul* (T_o) Terhadap *Average Cost* (C_1)



Gambar 4.9 Waktu *Optimum Overhaul* (T_o) Vs *Average Cost* (C_1)

Dari gambar di atas nilai *average cost* semakin besar maka nilai waktu *optimum overhaul* semakin kecil namun nilai *average cost* tersebar tidak menentu. Hal ini dapat terjadi karena nilai T_o tidak hanya bergantung pada nilai *average cost* saja tetapi juga nilai β .

4.4.3. Analisis Waktu *Optimum Overhaul* (T_o) Terhadap Lamda (λ)



Gambar 4.10 Waktu *Optimum Overhaul* (T_o) Vs Lamda (λ)

Untuk parameter λ (lamda) pengaruhnya tidak terlalu signifikan karena nilainya sangat kecil yaitu berkisar antara $2.18E-12 < \lambda < 0.0717$. Terdapat penyimpangan terdapat pada λ terbesar, ini dapat terjadi karena masih terdapat faktor β dan biaya yang lebih besar pengaruhnya.

4.4.4. Analisis Kesimpulan Waktu *Optimum Overhaul* (T_o)

Tabel 4.32 Kesimpulan Nilai *Optimum Overhaul* (T_o)

No	Jenis	T_q	T_o
1	DT 3049	15482	56720.3403
2	DT 3050	15171	#NUM!
3	DT 3051	15550	#NUM!
4	DT 3057	15198	22181.2469
5	DT 3058	13130	50163.7767
6	DT 3073	11378	33719.195
7	DT 3075	14113	12110.9234
8	DT 3076	9810	27397.247
9	DT 3083	11643	25584.7013
10	DT 3084	13645	74703.5458
11	DT 3085	12871	38502.2863
12	DT 3086	13062	#NUM!
13	DT 3087	13230	17123.3687
14	DT 3099	12499	9070.11223
15	DT 3101	11657	#NUM!
16	DT 3102	13120	#NUM!
17	DT 3106	12461	#NUM!
18	DT 680	13191	#NUM!
19	DT 786	18072	28168.2618
20	DT 787	3747	11152.777

Rata-rata engine harus di *overhaul* secara ekonomis adalah 31,277 *hourmeter*. Keterangan #NUM! berarti *engine* masih jauh untuk di *overhaul*. Ternyata terdapat nilai T_o yang kurang dari nilai umur sekarang yaitu pada DT 3099, ini berarti *engine* seharusnya telah di *overhaul* karena jika tidak biaya *maintenance* akan semakin meningkat. Nilai T_o maksimal pada DT 3084 dengan nilai 74703 *hmr*, nilai ini masih dapat berubah mengecil seiring bertambahnya kegagalan, nilai β , dan biaya.

5. KESIMPULAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pembahasan dan analisis dapat diambil beberapa kesimpulan antara lain:

1. Model Power Law yang digunakan sebagai model reliabilitas bagi sistem *engine dumptruck* HD 785-5 pada operasi penambangan PAMA tidak sesuai dengan semua sistem yang diteliti berdasarkan hasil uji dengan *cramér-von mises* (CVM) tidak seluruhnya berhasil karena dari 20 *dumptruck* yang diteliti terdapat 7 *dumptruck* yang mengalami *failed*.
2. Karena pengujian terhadap model NHPP dari dua model yang tersedia tidak sesuai untuk semua *dumptruck*, maka alternatif model lainnya lebih sesuai. Ini berarti model yang sesuai adalah GRP sehingga model ini terbaik untuk *repairable systems* berdasarkan nilai LKV yang paling positif.
3. Perhitungan dari model GRP menghasilkan nilai parameter β dan λ , dimana nilai β berkisar antara $0.5318284 \leq \beta \leq 3.0831163$ sedangkan nilai λ berkisar antara $2.18E-12 \leq \lambda \leq 0.0717$. Dengan hasil nilai β rata-rata > 1 yaitu 1.6510253 maka secara umum sistem sedang mengalami fase penurunan (*deterioration*).
4. Secara keseluruhan, nilai waktu *optimum overhaul* T_o untuk masing-masing *dumptruck* adalah:
 1. DT 3049 = 56720 *hmr*
 2. DT 3057 = 22181 *hmr*
 3. DT 3058 = 50164 *hmr*
 4. DT 3073 = 33719 *hmr*
 5. DT 3075 = 12110 *hmr*
 6. DT 3076 = 27397 *hmr*
 7. DT 3083 = 25584 *hmr*
 8. DT 3084 = 74703 *hmr*
 9. DT 3085 = 38502 *hmr*

10. DT 3087 = 17123 *hmr*

11. DT 3099 = 9070 *hmr*

12. DT 786 = 28168 *hmr*

13. DT 787 = 11152 *hmr*

sehingga rata-rata *engine* harus di *overhaul* secara ekonomis adalah 31,277 *hourmeter*. Sedangkan 7 *dumpruck* lainnya, nilai *To* belum dapat dihitung karena baru memiliki nilai $\beta < 1$.



DAFTAR REFERENSI

- Billinton, Roy & Ronald N. (1987). *Reliability Evaluation of Engineering Systems*. New York: Plenum Press.
- Blanchard, Benjamin S. (1992). *Logistics Engineering And Management*. (4th ed). New Jersey: Prentice-Hall International.
- Crow, Larry H. (1975). *Reliability Analysis for Complex, Repairable Systems*. Technical Report No.138, US Army Material Systems Analysis Activity, Aberdeen Proving Ground, Maryland.
- Crow, Larry H. (2008). *Practical Methods for Analyzing the Reliability of Repairable Systems*. Maret 10, 2008. Reliability HotWire Magazine, issue 64. <http://www.reliasoft.com/newsletter/v5i1/repairable.htm>
- Harinaldi. (2005). *Prinsip-Prinsip Statistik untuk Teknik dan Sains*. Jakarta: Penerbit Erlangga.
- Kececioglu, Dimitri. (1991). *Reliability Engineering Handbook*. (Vol.1). New Jersey: Prentice-Hall International.
- Kececioglu, Dimitri. (1991). *Reliability Engineering Handbook*. (Vol.2). New Jersey: Prentice-Hall International.
- Kijima, M. & Sumita, N. (1986). A useful generalization of renewal theory counting process governed by non-negative Markovian increments. *Journal of Applied Probability*, 23, 71-88.
- Kijima, M. (1989). Some results for repairable systems with general repair. *Journal of Applied Probability*, 20, 851-859.

Lewis, E.E. (1987). *Introduction To Reliability Engineering*. New York: John Wiley & Sons.

Mettas, A. & Wenbiao Z. (2004). *Modeling and Analysis of Complex Repairable Systems*, Technique Report, Reliasoft Corporation: Annual Reliability and Maintainability Symposium.

Mettas, A. & Wenbiao Z. (2005). *Modelling and Analysis of Repairable Systems with General Repair*. ReliaSoft Corporation: Annual Reliability and Maintainability Symposium.

NIST U.S. Commerce Department's Technology Administration. (2006, July 18). *Engineering Statistics Handbook*. April 4, 2008. <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook>

Rao, S.S. (1992). *Reliability-Based Design*. New York: Mc Graw Hill.

ReliaSoft Corporation. (2005). *Software Training Guide Reliasoft's RGA 6*. USA

ReliaSoft Corporation. (2008). *Avoiding a Common Mistake in the Analysis of Repairable Systems*. Maret 10, 2008. Reliability Edge, Volume 7, Issue 1, Tucson, AZ. <http://www.reliasoft.com/newsletter/v7i1/index.htm>

Rigdon, Steven & Asit P. Basu. (2000). *Statistical Methods for the Reliability of Repairable Systems*. New York: John Wiley & Sons, Inc.

Veber, B., M.Nagode & M. Fajdiga. (2007). *Generalized renewal process for repairable systems based on finite Weibull mixture*. Mei 9, 2008. Reliability Engineering and System Safety 93 (2008) 1461-1472. <http://www.sciencedirect.com/>

Yanez, M. et al. (2002). *Generalized renewal process for analysis of repairable systems with limited failure experience*. Mei 9,2008. *Reliability Engineering and System Safety* 77 (2002) 167-180.
<http://www.sciencedirect.com/>

York, Larrie. *How Long will a Marine Diesel Engine last?*. 2007.
<http://www.frontierpower.com>



Lampiran 1: Model NHPP Power Law Dengan RGA 6

					
Analysis Summary					
Model:	Power Law			Test Procedure:	Fielded-Repair
Beta:	1.2620			Analysis Method:	MLE
Lambda:	8.1643E-5			Input Type:	Cumulative
				Start Time:	0
				End Time:	18072
				Failures:	25.1308
System Summary					
System Name	Start Time	End Time	Failures	Beta	Lambda
DT 3049	0	15482	13	1.4911	7.3538E-6
DT 3050	0	15171	14	1.0766	0.0004
DT 3051	0	15550	15	0.8523	0.0040
DT 3057	0	15198	19	2.6134	2.2402E-10
DT 3058	0	13130	4	2.9777	2.1830E-12
DT 3073	0	11378	10	1.2728	6.8795E-5
DT 3075	0	14113	16	2.1792	1.4503E-8
DT 3076	0	9810	8	1.7262	1.0293E-6
DT 3083	0	11643	8	1.3639	2.2771E-5
DT 3084	0	13645	12	1.5531	4.5425E-6
DT 3085	0	12871	17	1.2266	0.0002
DT 3086	0	13062	22	1.0450	0.0011
DT 3087	0	13230	8	2.5201	3.2835E-10
DT 3099	0	12499	8	2.9217	8.5769E-12
DT 3101	0	11657	10	0.8275	0.0043
DT 3102	0	13120	9	0.6633	0.0167
DT 3106	0	12461	3	0.6578	0.0061
DT 680	0	13191	31	1.1442	0.0006
DT 786	0	18072	17	2.3973	1.0593E-9
DT 787	0	3747	11	2.0052	7.5092E-7
Statistical Results					
	Result	Lower	Test Value	Upper	
Superposition System					
Cram'er Von Mises	Failed	-	0.3934	0.1730	
Common Beta Hypothesis	Failed	11.6509	37.7373	27.2036	
DT 3049					
Cram'er Von Mises	Failed	-	0.2476	0.1690	
Laplace Trend	No Trend	-1.6449	0.5132	1.6449	
DT 3050					
Cram'er Von Mises	Failed	-	0.3547	0.1690	
Laplace Trend	No Trend	-1.6449	1.2987	1.6449	
DT 3051					
Cram'er Von Mises	Passed	-	0.0663	0.1690	
Laplace Trend	No Trend	-1.6449	-1.0398	1.6449	
DT 3057					
Cram'er Von Mises	Passed	-	0.1526	0.1710	
Laplace Trend	Deteriorating	-1.6449	3.1631	1.6449	
DT 3058					
Cram'er Von Mises	Passed	-	0.0670	0.1550	
Laplace Trend	Deteriorating	-1.6449	1.6599	1.6449	
DT 3073					

(sambungan)

Cram'er Von Mises	Passed	-	0.0934	0.1670
Laplace Trend	No Trend	-1.6449	0.5056	1.6449

DT 3075

Cram'er Von Mises	Failed	-	0.6238	0.1710
Laplace Trend	Deteriorating	-1.6449	3.3028	1.6449

DT 3076

Cram'er Von Mises	Passed	-	0.1079	0.1650
Laplace Trend	No Trend	-1.6449	1.2784	1.6449

DT 3083

Cram'er Von Mises	Passed	-	0.0591	0.1650
Laplace Trend	No Trend	-1.6449	0.3864	1.6449

DT 3084

Cram'er Von Mises	Passed	-	0.1417	0.1690
Laplace Trend	Deteriorating	-1.6449	1.8089	1.6449

DT 3085

Cram'er Von Mises	Failed	-	0.2418	0.1710
Laplace Trend	No Trend	-1.6449	1.5300	1.6449

DT 3086

Cram'er Von Mises	Failed	-	0.5732	0.1720
Laplace Trend	Deteriorating	-1.6449	2.0179	1.6449

DT 3087

Cram'er Von Mises	Passed	-	0.0700	0.1650
Laplace Trend	Deteriorating	-1.6449	2.1911	1.6449

DT 3099

Cram'er Von Mises	Passed	-	0.1545	0.1650
Laplace Trend	Deteriorating	-1.6449	2.4698	1.6449

DT 3101

Cram'er Von Mises	Passed	-	0.0803	0.1670
Laplace Trend	No Trend	-1.6449	-0.1349	1.6449

DT 3102

Cram'er Von Mises	Passed	-	0.1588	0.1670
Laplace Trend	No Trend	-1.6449	-0.1615	1.6449

DT 3106

Cram'er Von Mises	Passed	-	0.0767	0.1540
Laplace Trend	No Trend	-1.6449	-0.5492	1.6449

DT 680

Cram'er Von Mises	Failed	-	0.1851	0.1720
Laplace Trend	No Trend	-1.6449	1.3772	1.6449

DT 786

Cram'er Von Mises	Failed	-	0.1764	0.1710
Laplace Trend	Deteriorating	-1.6449	3.1236	1.6449

DT 787

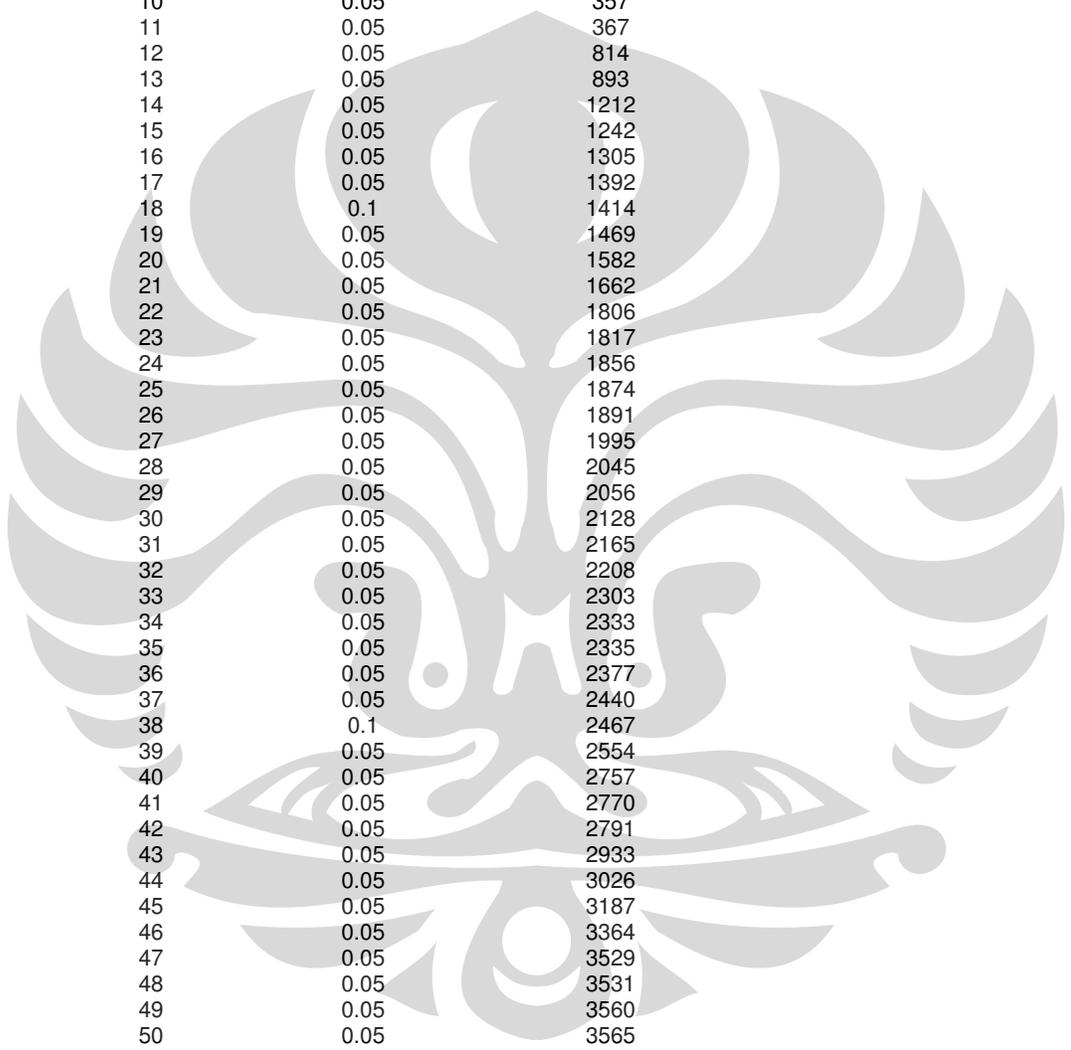
Cram'er Von Mises	Passed	-	0.0659	0.1690
Laplace Trend	No Trend	-1.6449	1.6342	1.6449

Data

Superposition System

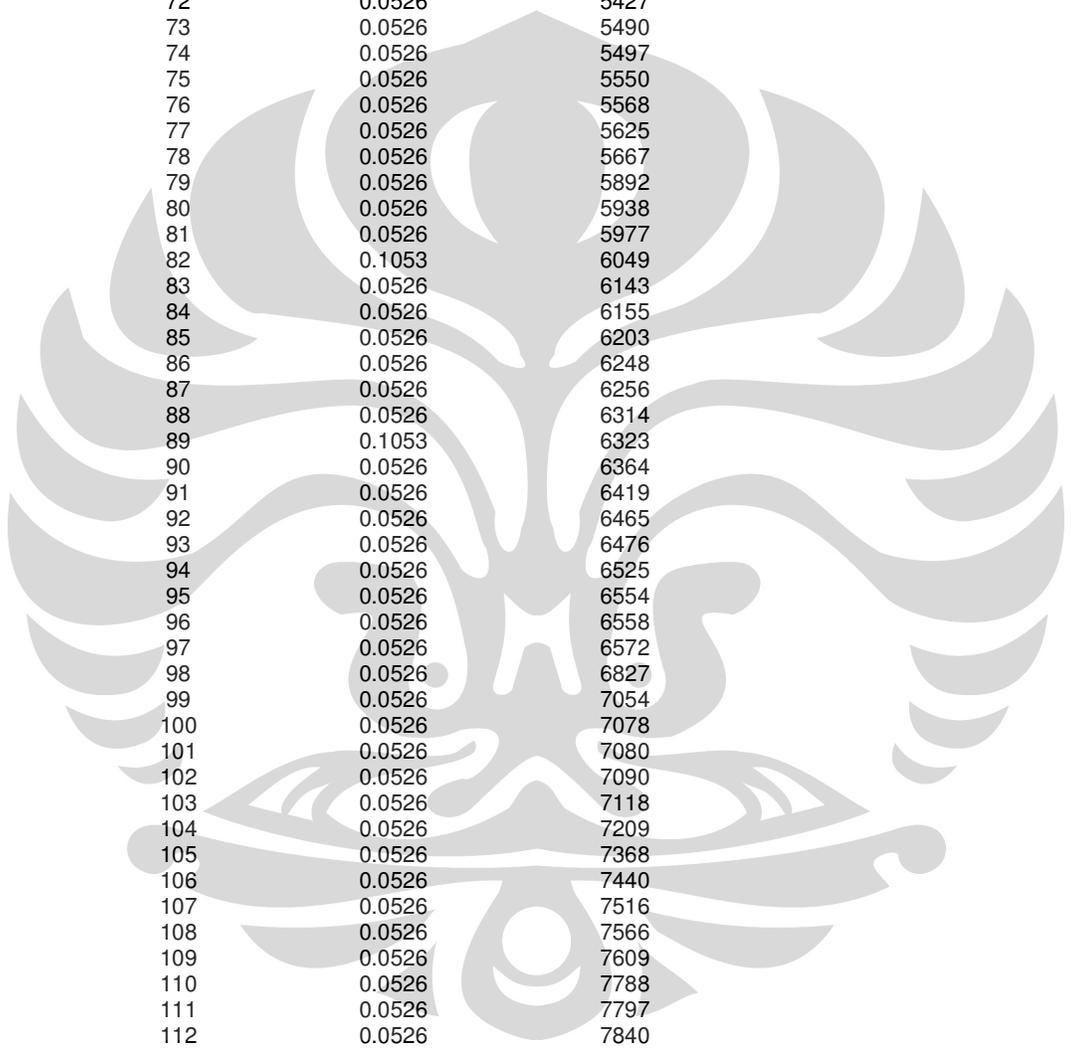
Item Number	Number At Event	Time to Event
-------------	-----------------	---------------

(sambungan)



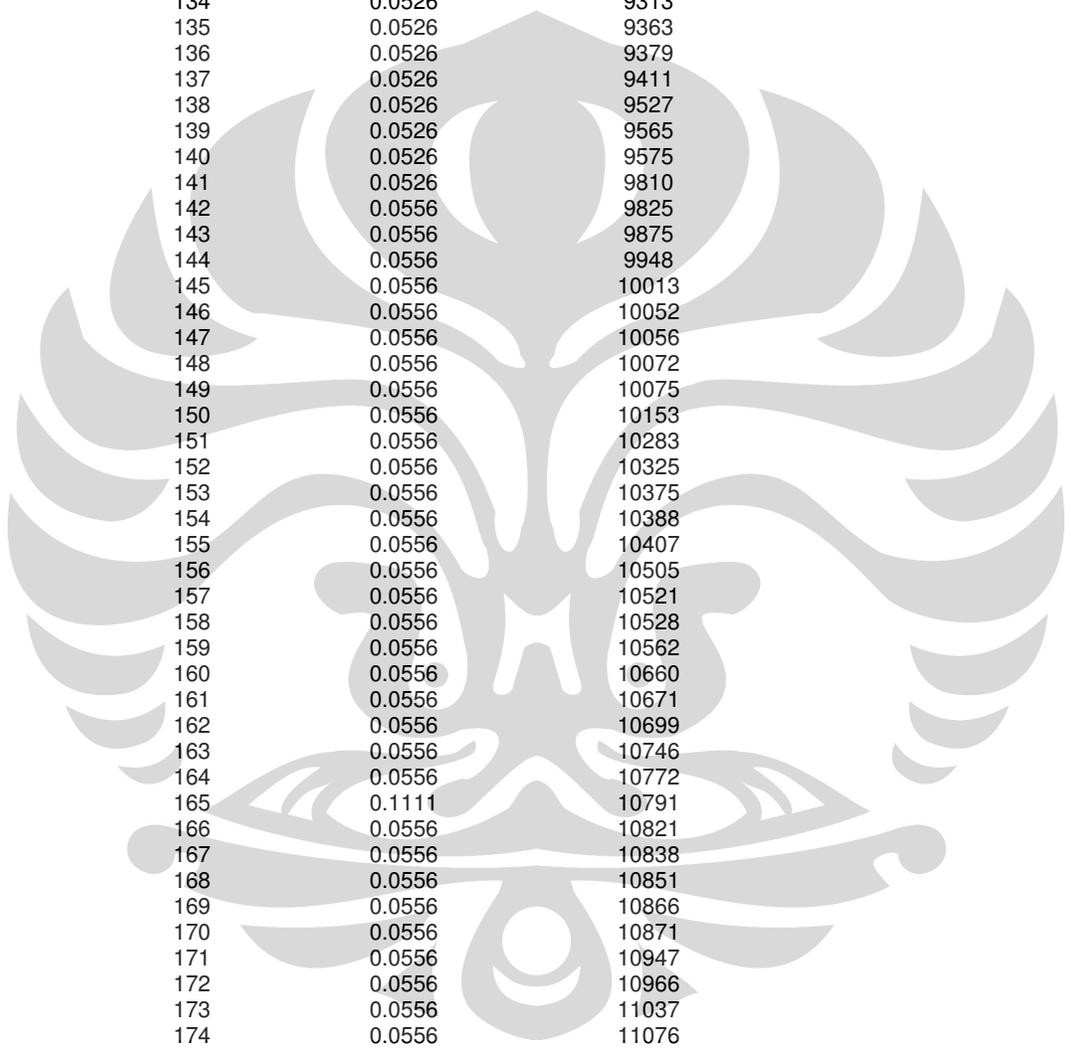
1	0.05	34
2	0.05	42
3	0.05	56
4	0.05	157
5	0.05	158
6	0.05	207
7	0.05	225
8	0.05	345
9	0.05	354
10	0.05	357
11	0.05	367
12	0.05	814
13	0.05	893
14	0.05	1212
15	0.05	1242
16	0.05	1305
17	0.05	1392
18	0.1	1414
19	0.05	1469
20	0.05	1582
21	0.05	1662
22	0.05	1806
23	0.05	1817
24	0.05	1856
25	0.05	1874
26	0.05	1891
27	0.05	1995
28	0.05	2045
29	0.05	2056
30	0.05	2128
31	0.05	2165
32	0.05	2208
33	0.05	2303
34	0.05	2333
35	0.05	2335
36	0.05	2377
37	0.05	2440
38	0.1	2467
39	0.05	2554
40	0.05	2757
41	0.05	2770
42	0.05	2791
43	0.05	2933
44	0.05	3026
45	0.05	3187
46	0.05	3364
47	0.05	3529
48	0.05	3531
49	0.05	3560
50	0.05	3565
51	0.05	3579
52	0.05	3705
53	0.05	3747
54	0.0526	3822
55	0.0526	3900
56	0.0526	4225
57	0.0526	4326
58	0.0526	4336
59	0.0526	4407
60	0.0526	4429
61	0.0526	4613
62	0.0526	4732

(sambungan)



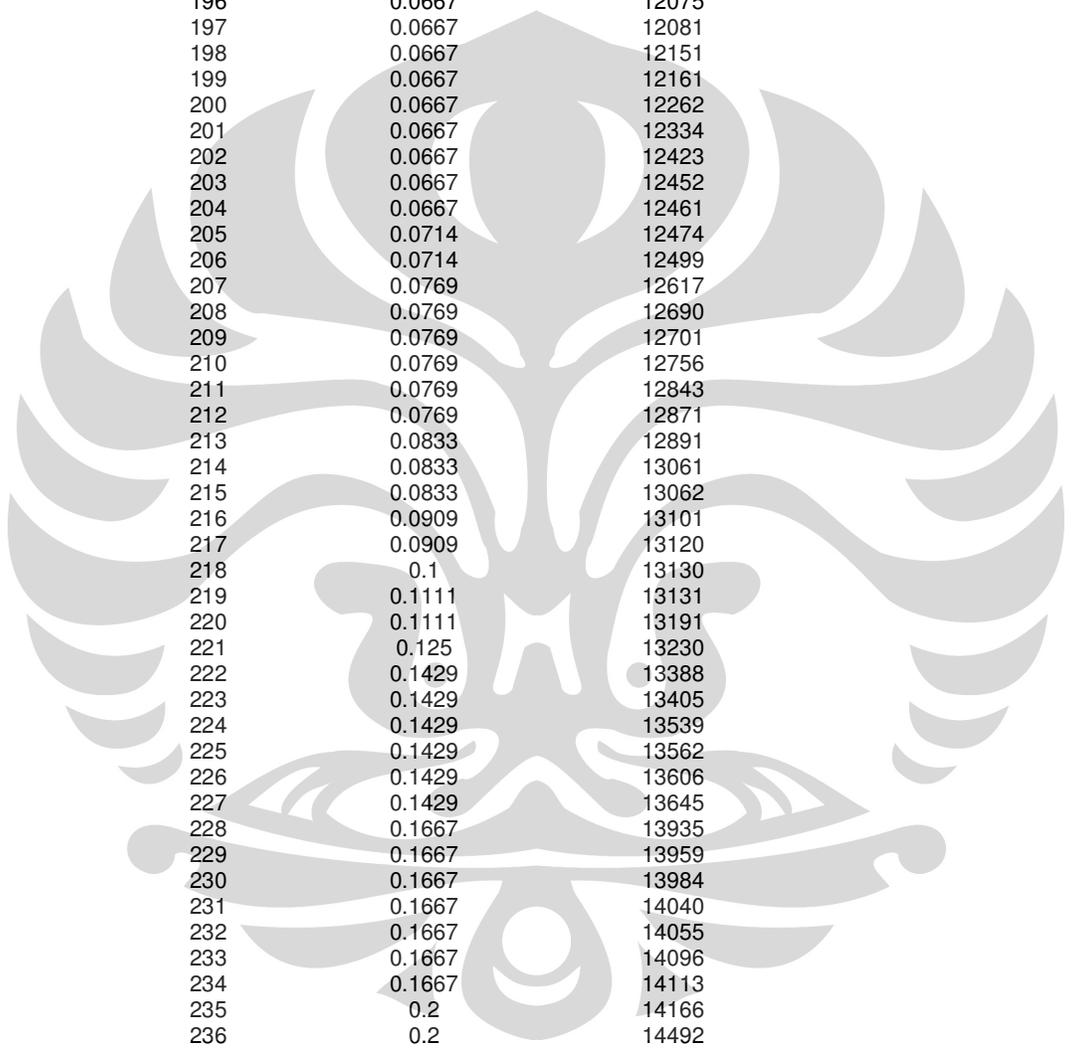
63	0.0526	4858
64	0.0526	4995
65	0.0526	5216
66	0.0526	5252
67	0.0526	5291
68	0.0526	5312
69	0.0526	5314
70	0.0526	5336
71	0.0526	5374
72	0.0526	5427
73	0.0526	5490
74	0.0526	5497
75	0.0526	5550
76	0.0526	5568
77	0.0526	5625
78	0.0526	5667
79	0.0526	5892
80	0.0526	5938
81	0.0526	5977
82	0.1053	6049
83	0.0526	6143
84	0.0526	6155
85	0.0526	6203
86	0.0526	6248
87	0.0526	6256
88	0.0526	6314
89	0.1053	6323
90	0.0526	6364
91	0.0526	6419
92	0.0526	6465
93	0.0526	6476
94	0.0526	6525
95	0.0526	6554
96	0.0526	6558
97	0.0526	6572
98	0.0526	6827
99	0.0526	7054
100	0.0526	7078
101	0.0526	7080
102	0.0526	7090
103	0.0526	7118
104	0.0526	7209
105	0.0526	7368
106	0.0526	7440
107	0.0526	7516
108	0.0526	7566
109	0.0526	7609
110	0.0526	7788
111	0.0526	7797
112	0.0526	7840
113	0.0526	7940
114	0.0526	8007
115	0.0526	8021
116	0.0526	8028
117	0.0526	8093
118	0.0526	8100
119	0.0526	8114
120	0.0526	8122
121	0.0526	8226
122	0.0526	8247
123	0.0526	8325
124	0.0526	8440

(sambungan)



125	0.0526	8501
126	0.0526	8574
127	0.0526	8855
128	0.0526	8912
129	0.0526	8938
130	0.0526	8981
131	0.0526	8986
132	0.0526	9022
133	0.0526	9298
134	0.0526	9313
135	0.0526	9363
136	0.0526	9379
137	0.0526	9411
138	0.0526	9527
139	0.0526	9565
140	0.0526	9575
141	0.0526	9810
142	0.0556	9825
143	0.0556	9875
144	0.0556	9948
145	0.0556	10013
146	0.0556	10052
147	0.0556	10056
148	0.0556	10072
149	0.0556	10075
150	0.0556	10153
151	0.0556	10283
152	0.0556	10325
153	0.0556	10375
154	0.0556	10388
155	0.0556	10407
156	0.0556	10505
157	0.0556	10521
158	0.0556	10528
159	0.0556	10562
160	0.0556	10660
161	0.0556	10671
162	0.0556	10699
163	0.0556	10746
164	0.0556	10772
165	0.1111	10791
166	0.0556	10821
167	0.0556	10838
168	0.0556	10851
169	0.0556	10866
170	0.0556	10871
171	0.0556	10947
172	0.0556	10966
173	0.0556	11037
174	0.0556	11076
175	0.0556	11077
176	0.0556	11083
177	0.0556	11089
178	0.0556	11101
179	0.0556	11155
180	0.0556	11200
181	0.0556	11291
182	0.0556	11293
183	0.0556	11378
184	0.0588	11406
185	0.0588	11485
186	0.0588	11588

(sambungan)



187	0.0588	11643
188	0.0625	11657
189	0.0667	11750
190	0.0667	11806
191	0.0667	11828
192	0.0667	11974
193	0.0667	12027
194	0.0667	12048
195	0.0667	12057
196	0.0667	12075
197	0.0667	12081
198	0.0667	12151
199	0.0667	12161
200	0.0667	12262
201	0.0667	12334
202	0.0667	12423
203	0.0667	12452
204	0.0667	12461
205	0.0714	12474
206	0.0714	12499
207	0.0769	12617
208	0.0769	12690
209	0.0769	12701
210	0.0769	12756
211	0.0769	12843
212	0.0769	12871
213	0.0833	12891
214	0.0833	13061
215	0.0833	13062
216	0.0909	13101
217	0.0909	13120
218	0.1	13130
219	0.1111	13131
220	0.1111	13191
221	0.125	13230
222	0.1429	13388
223	0.1429	13405
224	0.1429	13539
225	0.1429	13562
226	0.1429	13606
227	0.1429	13645
228	0.1667	13935
229	0.1667	13959
230	0.1667	13984
231	0.1667	14040
232	0.1667	14055
233	0.1667	14096
234	0.1667	14113
235	0.2	14166
236	0.2	14492
237	0.2	15123
238	0.2	15171
239	0.25	15198
240	0.3333	15482
241	0.5	15546
242	0.5	15550
243	1	16062
244	1	16106
245	1	16139
246	1	16201
247	1	16680
248	1	17513

(sambungan)

249	1	17871
250	1	18072

DT 3049

Item Number	Time to Event	Comment 1
1	4429	
2	4995	
3	5427	
4	6465	
5	7090	
6	7788	
7	7940	
8	8912	
9	8981	
10	9527	
11	10791	
12	11076	
13	15482	

DT 3050

Item Number	Time to Event	Comment 1
1	158	
2	1874	
3	2757	
4	3529	
5	3565	
6	7209	
7	9022	
8	13405	
9	13606	
10	13935	
11	13959	
12	14166	
13	15123	
14	15171	

DT 3051

Item Number	Time to Event	Comment 1
1	354	
2	1242	
3	2165	
4	3187	
5	4407	
6	4858	
7	5336	
8	5568	
9	5938	
10	7797	
11	10153	
12	10505	
13	10521	
14	10966	
15	15550	

DT 3057

Item Number	Time to Event	Comment 1
1	5550	
2	6155	
3	6827	
4	7080	
5	8007	
6	8501	

(sambungan)

7	10746
8	11089
9	12027
10	12048
11	12081
12	12262
13	12334
14	12423
15	12452
16	12756
17	12843
18	14492
19	15198

DT 3058

Item Number	Time to Event	Comment 1
1	7118	
2	7440	
3	11155	
4	13130	

DT 3073

Item Number	Time to Event	Comment 1
1	1856	
2	2467	
3	2770	
4	3822	
5	5374	
6	6256	
7	6364	
8	10562	
9	11293	
10	11378	

DT 3075

Item Number	Time to Event	Comment 1
1	1891	
2	2335	
3	4225	
4	5312	
5	8122	
6	11037	
7	11806	
8	12161	
9	13061	
10	13101	
11	13388	
12	13984	
13	14040	
14	14055	
15	14096	
16	14113	

DT 3076

Item Number	Time to Event	Comment 1
1	2128	
2	3364	
3	4613	
4	5216	
5	5625	
6	9313	
7	9411	

(sambungan)

8 9810

DT 3083

Item Number	Time to Event	Comment 1
1	2440	
2	2791	
3	5252	
4	5314	
5	6558	
6	8021	
7	8226	
8	11643	

DT 3084

Item Number	Time to Event	Comment 1
1	893	
2	1806	
3	6419	
4	8247	
5	8325	
6	9379	
7	10072	
8	10947	
9	11200	
10	12057	
11	13562	
12	13645	

DT 3085

Item Number	Time to Event	Comment 1
1	225	
2	1392	
3	1817	
4	2333	
5	5291	
6	6525	
7	8100	
8	8855	
9	9575	
10	9948	
11	10013	
12	10325	
13	10407	
14	11588	
15	11750	
16	11828	
17	12871	

DT 3086

Item Number	Time to Event	Comment 1
1	34	
2	42	
3	1469	
4	3900	
5	4732	
6	6323	
7	6554	
8	7566	
9	8574	
10	8938	
11	9298	
12	10052	

(sambungan)

13	10075
14	10283
15	10375
16	10388
17	10772
18	10791
19	11101
20	12151
21	12891
22	13062

DT 3087

Item Number	Time to Event	Comment 1
1	3705	
2	6143	
3	7609	
4	10528	
5	10699	
6	11974	
7	12701	
8	13230	

DT 3099

Item Number	Time to Event	Comment 1
1	4336	
2	6572	
3	7840	
4	8114	
5	11291	
6	12075	
7	12474	
8	12499	

DT 3101

Item Number	Time to Event	Comment 1
1	345	
2	357	
3	2554	
4	3560	
5	3579	
6	7516	
7	8093	
8	9363	
9	9825	
10	11657	

DT 3102

Item Number	Time to Event	Comment 1
1	56	
2	367	
3	1414	
4	6248	
5	7078	
6	8028	
7	10056	
8	10838	
9	13120	

DT 3106

Item Number	Time to Event	Comment 1
1	814	

(sambungan)

3 12461

DT 680

Item Number	Time to Event	Comment 1
1	157	
2	207	
3	1212	
4	1662	
5	2056	
6	2467	
7	5490	
8	5497	
9	5667	
10	5977	
11	6049	
12	6203	
13	6323	
14	6476	
15	7054	
16	7368	
17	8440	
18	8986	
19	9565	
20	10660	
21	10671	
22	10821	
23	10851	
24	10866	
25	10871	
26	11077	
27	11083	
28	11406	
29	12617	
30	12690	
31	13191	

DT 786

Item Number	Time to Event	Comment 1
1	4326	
2	5892	
3	6049	
4	6314	
5	9875	
6	11485	
7	13131	
8	13539	
9	15546	
10	16062	
11	16106	
12	16139	
13	16201	
14	16680	
15	17513	
16	17871	
17	18072	

DT 787

Item Number	Time to Event	Comment 1
1	1305	
2	1414	
3	1582	
4	2045	

(sambungan)

5	2208
6	2303
7	2377
8	2933
9	3026
10	3531
11	3747



Lampiran 2: Model GRP-3 Parameter Dengan Weibull ++7

Jenis DT	Model GRP I	Model GRP II																				
DT 3049	<table border="1"> <thead> <tr> <th>FI Function</th> <th>Power Law</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Beta</td> <td>1.491095794</td> </tr> <tr> <td>Lambda</td> <td>7.35E-06</td> </tr> <tr> <td>q</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>LK Value</td> <td>-104.1602247</td> </tr> </tbody> </table>	FI Function	Power Law	Beta	1.491095794	Lambda	7.35E-06	q	1	LK Value	-104.1602247	<table border="1"> <thead> <tr> <th>FI Function</th> <th>Power Law</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Beta</td> <td>1.763234993</td> </tr> <tr> <td>Lambda</td> <td>8.45E-07</td> </tr> <tr> <td>q</td> <td>0.865697109</td> </tr> <tr> <td>LK Value</td> <td>-103.6244124</td> </tr> </tbody> </table>	FI Function	Power Law	Beta	1.763234993	Lambda	8.45E-07	q	0.865697109	LK Value	-103.6244124
FI Function	Power Law																					
Beta	1.491095794																					
Lambda	7.35E-06																					
q	1																					
LK Value	-104.1602247																					
FI Function	Power Law																					
Beta	1.763234993																					
Lambda	8.45E-07																					
q	0.865697109																					
LK Value	-103.6244124																					
DT 3050	<table border="1"> <thead> <tr> <th>FI Function</th> <th>Power Law</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Beta</td> <td>0.69880181</td> </tr> <tr> <td>Lambda</td> <td>8.99E-03</td> </tr> <tr> <td>q</td> <td>4.01E-04</td> </tr> <tr> <td>LK Value</td> <td>-110.406601</td> </tr> </tbody> </table>	FI Function	Power Law	Beta	0.69880181	Lambda	8.99E-03	q	4.01E-04	LK Value	-110.406601	<table border="1"> <thead> <tr> <th>FI Function</th> <th>Power Law</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Beta</td> <td>0.657713863</td> </tr> <tr> <td>Lambda</td> <td>1.27E-02</td> </tr> <tr> <td>q</td> <td>2.30E-02</td> </tr> <tr> <td>LK Value</td> <td>-110.262977</td> </tr> </tbody> </table>	FI Function	Power Law	Beta	0.657713863	Lambda	1.27E-02	q	2.30E-02	LK Value	-110.262977
FI Function	Power Law																					
Beta	0.69880181																					
Lambda	8.99E-03																					
q	4.01E-04																					
LK Value	-110.406601																					
FI Function	Power Law																					
Beta	0.657713863																					
Lambda	1.27E-02																					
q	2.30E-02																					
LK Value	-110.262977																					
DT 3051	<table border="1"> <thead> <tr> <th>FI Function</th> <th>Power Law</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Beta</td> <td>0.85232862</td> </tr> <tr> <td>Lambda</td> <td>4.01E-03</td> </tr> <tr> <td>q</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>LK Value</td> <td>-118.9543867</td> </tr> </tbody> </table>	FI Function	Power Law	Beta	0.85232862	Lambda	4.01E-03	q	1	LK Value	-118.9543867	<table border="1"> <thead> <tr> <th>FI Function</th> <th>Power Law</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Beta</td> <td>0.85232862</td> </tr> <tr> <td>Lambda</td> <td>4.01E-03</td> </tr> <tr> <td>q</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>LK Value</td> <td>-118.9543867</td> </tr> </tbody> </table>	FI Function	Power Law	Beta	0.85232862	Lambda	4.01E-03	q	1	LK Value	-118.9543867
FI Function	Power Law																					
Beta	0.85232862																					
Lambda	4.01E-03																					
q	1																					
LK Value	-118.9543867																					
FI Function	Power Law																					
Beta	0.85232862																					
Lambda	4.01E-03																					
q	1																					
LK Value	-118.9543867																					
DT 3057	<table border="1"> <thead> <tr> <th>FI Function</th> <th>Power Law</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Beta</td> <td>2.613350561</td> </tr> <tr> <td>Lambda</td> <td>2.24E-10</td> </tr> <tr> <td>q</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>LK Value</td> <td>-139.4827328</td> </tr> </tbody> </table>	FI Function	Power Law	Beta	2.613350561	Lambda	2.24E-10	q	1	LK Value	-139.4827328	<table border="1"> <thead> <tr> <th>FI Function</th> <th>Power Law</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Beta</td> <td>2.646788328</td> </tr> <tr> <td>Lambda</td> <td>2.24E-10</td> </tr> <tr> <td>q</td> <td>0.972927528</td> </tr> <tr> <td>LK Value</td> <td>-139.1192713</td> </tr> </tbody> </table>	FI Function	Power Law	Beta	2.646788328	Lambda	2.24E-10	q	0.972927528	LK Value	-139.1192713
FI Function	Power Law																					
Beta	2.613350561																					
Lambda	2.24E-10																					
q	1																					
LK Value	-139.4827328																					
FI Function	Power Law																					
Beta	2.646788328																					
Lambda	2.24E-10																					
q	0.972927528																					
LK Value	-139.1192713																					
DT 3058	<table border="1"> <thead> <tr> <th>FI Function</th> <th>Power Law</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Beta</td> <td>3.039558625</td> </tr> <tr> <td>Lambda</td> <td>2.18E-12</td> </tr> <tr> <td>q</td> <td>0.644925216</td> </tr> <tr> <td>LK Value</td> <td>-34.49698885</td> </tr> </tbody> </table>	FI Function	Power Law	Beta	3.039558625	Lambda	2.18E-12	q	0.644925216	LK Value	-34.49698885	<table border="1"> <thead> <tr> <th>FI Function</th> <th>Power Law</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Beta</td> <td>3.083116309</td> </tr> <tr> <td>Lambda</td> <td>2.18E-12</td> </tr> <tr> <td>q</td> <td>0.66278263</td> </tr> <tr> <td>LK Value</td> <td>-33.94055692</td> </tr> </tbody> </table>	FI Function	Power Law	Beta	3.083116309	Lambda	2.18E-12	q	0.66278263	LK Value	-33.94055692
FI Function	Power Law																					
Beta	3.039558625																					
Lambda	2.18E-12																					
q	0.644925216																					
LK Value	-34.49698885																					
FI Function	Power Law																					
Beta	3.083116309																					
Lambda	2.18E-12																					
q	0.66278263																					
LK Value	-33.94055692																					
DT 3073	<table border="1"> <thead> <tr> <th>FI Function</th> <th>Power Law</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Beta</td> <td>1.272771308</td> </tr> <tr> <td>Lambda</td> <td>6.88E-05</td> </tr> <tr> <td>q</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>LK Value</td> <td>-80.099681</td> </tr> </tbody> </table>	FI Function	Power Law	Beta	1.272771308	Lambda	6.88E-05	q	1	LK Value	-80.099681	<table border="1"> <thead> <tr> <th>FI Function</th> <th>Power Law</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Beta</td> <td>1.641417748</td> </tr> <tr> <td>Lambda</td> <td>3.85E-06</td> </tr> <tr> <td>q</td> <td>0.634575064</td> </tr> <tr> <td>LK Value</td> <td>-79.6841649</td> </tr> </tbody> </table>	FI Function	Power Law	Beta	1.641417748	Lambda	3.85E-06	q	0.634575064	LK Value	-79.6841649
FI Function	Power Law																					
Beta	1.272771308																					
Lambda	6.88E-05																					
q	1																					
LK Value	-80.099681																					
FI Function	Power Law																					
Beta	1.641417748																					
Lambda	3.85E-06																					
q	0.634575064																					
LK Value	-79.6841649																					
DT 3075	<table border="1"> <thead> <tr> <th>FI Function</th> <th>Power Law</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Beta</td> <td>2.263716475</td> </tr> <tr> <td>Lambda</td> <td>1.45E-08</td> </tr> <tr> <td>q</td> <td>0.462157959</td> </tr> <tr> <td>LK Value</td> <td>-120.3416783</td> </tr> </tbody> </table>	FI Function	Power Law	Beta	2.263716475	Lambda	1.45E-08	q	0.462157959	LK Value	-120.3416783	<table border="1"> <thead> <tr> <th>FI Function</th> <th>Power Law</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Beta</td> <td>2.179154617</td> </tr> <tr> <td>Lambda</td> <td>1.45E-08</td> </tr> <tr> <td>q</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>LK Value</td> <td>-120.7109177</td> </tr> </tbody> </table>	FI Function	Power Law	Beta	2.179154617	Lambda	1.45E-08	q	1	LK Value	-120.7109177
FI Function	Power Law																					
Beta	2.263716475																					
Lambda	1.45E-08																					
q	0.462157959																					
LK Value	-120.3416783																					
FI Function	Power Law																					
Beta	2.179154617																					
Lambda	1.45E-08																					
q	1																					
LK Value	-120.7109177																					

(sambungan)

Jenis DT	Model GRP I	Model GRP II																				
DT 3076	<table border="1"><thead><tr><th>FI Function</th><th>Power Law</th></tr></thead><tbody><tr><td>Beta</td><td>1.772870337</td></tr><tr><td>Lambda</td><td>9.55E-07</td></tr><tr><td>q</td><td>0.52228207</td></tr><tr><td>LK Value</td><td>-63.8073895</td></tr></tbody></table>	FI Function	Power Law	Beta	1.772870337	Lambda	9.55E-07	q	0.52228207	LK Value	-63.8073895	<table border="1"><thead><tr><th>FI Function</th><th>Power Law</th></tr></thead><tbody><tr><td>Beta</td><td>1.726228031</td></tr><tr><td>Lambda</td><td>1.03E-06</td></tr><tr><td>q</td><td>1</td></tr><tr><td>LK Value</td><td>-63.8918366</td></tr></tbody></table>	FI Function	Power Law	Beta	1.726228031	Lambda	1.03E-06	q	1	LK Value	-63.8918366
FI Function	Power Law																					
Beta	1.772870337																					
Lambda	9.55E-07																					
q	0.52228207																					
LK Value	-63.8073895																					
FI Function	Power Law																					
Beta	1.726228031																					
Lambda	1.03E-06																					
q	1																					
LK Value	-63.8918366																					
DT 3083	<table border="1"><thead><tr><th>FI Function</th><th>Power Law</th></tr></thead><tbody><tr><td>Beta</td><td>1.363899331</td></tr><tr><td>Lambda</td><td>2.28E-05</td></tr><tr><td>q</td><td>1</td></tr><tr><td>LK Value</td><td>-65.91583347</td></tr></tbody></table>	FI Function	Power Law	Beta	1.363899331	Lambda	2.28E-05	q	1	LK Value	-65.91583347	<table border="1"><thead><tr><th>FI Function</th><th>Power Law</th></tr></thead><tbody><tr><td>Beta</td><td>1.808915734</td></tr><tr><td>Lambda</td><td>8.81E-07</td></tr><tr><td>q</td><td>0.510885609</td></tr><tr><td>LK Value</td><td>-64.84778206</td></tr></tbody></table>	FI Function	Power Law	Beta	1.808915734	Lambda	8.81E-07	q	0.510885609	LK Value	-64.84778206
FI Function	Power Law																					
Beta	1.363899331																					
Lambda	2.28E-05																					
q	1																					
LK Value	-65.91583347																					
FI Function	Power Law																					
Beta	1.808915734																					
Lambda	8.81E-07																					
q	0.510885609																					
LK Value	-64.84778206																					
DT 3084	<table border="1"><thead><tr><th>FI Function</th><th>Power Law</th></tr></thead><tbody><tr><td>Beta</td><td>1.55306529</td></tr><tr><td>Lambda</td><td>4.54E-06</td></tr><tr><td>q</td><td>1</td></tr><tr><td>LK Value</td><td>-95.425239</td></tr></tbody></table>	FI Function	Power Law	Beta	1.55306529	Lambda	4.54E-06	q	1	LK Value	-95.425239	<table border="1"><thead><tr><th>FI Function</th><th>Power Law</th></tr></thead><tbody><tr><td>Beta</td><td>1.55306529</td></tr><tr><td>Lambda</td><td>4.54E-06</td></tr><tr><td>q</td><td>1</td></tr><tr><td>LK Value</td><td>-95.425239</td></tr></tbody></table>	FI Function	Power Law	Beta	1.55306529	Lambda	4.54E-06	q	1	LK Value	-95.425239
FI Function	Power Law																					
Beta	1.55306529																					
Lambda	4.54E-06																					
q	1																					
LK Value	-95.425239																					
FI Function	Power Law																					
Beta	1.55306529																					
Lambda	4.54E-06																					
q	1																					
LK Value	-95.425239																					
DT 3085	<table border="1"><thead><tr><th>FI Function</th><th>Power Law</th></tr></thead><tbody><tr><td>Beta</td><td>1.439288872</td></tr><tr><td>Lambda</td><td>3.63E-05</td></tr><tr><td>q</td><td>0.170922927</td></tr><tr><td>LK Value</td><td>-129.0911605</td></tr></tbody></table>	FI Function	Power Law	Beta	1.439288872	Lambda	3.63E-05	q	0.170922927	LK Value	-129.0911605	<table border="1"><thead><tr><th>FI Function</th><th>Power Law</th></tr></thead><tbody><tr><td>Beta</td><td>1.226555346</td></tr><tr><td>Lambda</td><td>1.55E-04</td></tr><tr><td>q</td><td>1</td></tr><tr><td>LK Value</td><td>-129.3702986</td></tr></tbody></table>	FI Function	Power Law	Beta	1.226555346	Lambda	1.55E-04	q	1	LK Value	-129.3702986
FI Function	Power Law																					
Beta	1.439288872																					
Lambda	3.63E-05																					
q	0.170922927																					
LK Value	-129.0911605																					
FI Function	Power Law																					
Beta	1.226555346																					
Lambda	1.55E-04																					
q	1																					
LK Value	-129.3702986																					
DT 3086	<table border="1"><thead><tr><th>FI Function</th><th>Power Law</th></tr></thead><tbody><tr><td>Beta</td><td>0.771440832</td></tr><tr><td>Lambda</td><td>8.15E-03</td></tr><tr><td>q</td><td>6.08E-04</td></tr><tr><td>LK Value</td><td>-161.542651</td></tr></tbody></table>	FI Function	Power Law	Beta	0.771440832	Lambda	8.15E-03	q	6.08E-04	LK Value	-161.542651	<table border="1"><thead><tr><th>FI Function</th><th>Power Law</th></tr></thead><tbody><tr><td>Beta</td><td>0.531828425</td></tr><tr><td>Lambda</td><td>7.17E-02</td></tr><tr><td>q</td><td>0.434976645</td></tr><tr><td>LK Value</td><td>-160.032923</td></tr></tbody></table>	FI Function	Power Law	Beta	0.531828425	Lambda	7.17E-02	q	0.434976645	LK Value	-160.032923
FI Function	Power Law																					
Beta	0.771440832																					
Lambda	8.15E-03																					
q	6.08E-04																					
LK Value	-161.542651																					
FI Function	Power Law																					
Beta	0.531828425																					
Lambda	7.17E-02																					
q	0.434976645																					
LK Value	-160.032923																					
DT 3087	<table border="1"><thead><tr><th>FI Function</th><th>Power Law</th></tr></thead><tbody><tr><td>Beta</td><td>2.688086167</td></tr><tr><td>Lambda</td><td>3.28E-10</td></tr><tr><td>q</td><td>0.279561913</td></tr><tr><td>LK Value</td><td>-63.54096041</td></tr></tbody></table>	FI Function	Power Law	Beta	2.688086167	Lambda	3.28E-10	q	0.279561913	LK Value	-63.54096041	<table border="1"><thead><tr><th>FI Function</th><th>Power Law</th></tr></thead><tbody><tr><td>Beta</td><td>2.572049793</td></tr><tr><td>Lambda</td><td>3.28E-10</td></tr><tr><td>q</td><td>0.872823864</td></tr><tr><td>LK Value</td><td>-64.51363526</td></tr></tbody></table>	FI Function	Power Law	Beta	2.572049793	Lambda	3.28E-10	q	0.872823864	LK Value	-64.51363526
FI Function	Power Law																					
Beta	2.688086167																					
Lambda	3.28E-10																					
q	0.279561913																					
LK Value	-63.54096041																					
FI Function	Power Law																					
Beta	2.572049793																					
Lambda	3.28E-10																					
q	0.872823864																					
LK Value	-64.51363526																					
DT 3099	<table border="1"><thead><tr><th>FI Function</th><th>Power Law</th></tr></thead><tbody><tr><td>Beta</td><td>3.02972369</td></tr><tr><td>Lambda</td><td>8.58E-12</td></tr><tr><td>q</td><td>0.524603816</td></tr><tr><td>LK Value</td><td>-63.0754845</td></tr></tbody></table>	FI Function	Power Law	Beta	3.02972369	Lambda	8.58E-12	q	0.524603816	LK Value	-63.0754845	<table border="1"><thead><tr><th>FI Function</th><th>Power Law</th></tr></thead><tbody><tr><td>Beta</td><td>2.955728973</td></tr><tr><td>Lambda</td><td>8.58E-12</td></tr><tr><td>q</td><td>0.933694115</td></tr><tr><td>LK Value</td><td>-63.4517147</td></tr></tbody></table>	FI Function	Power Law	Beta	2.955728973	Lambda	8.58E-12	q	0.933694115	LK Value	-63.4517147
FI Function	Power Law																					
Beta	3.02972369																					
Lambda	8.58E-12																					
q	0.524603816																					
LK Value	-63.0754845																					
FI Function	Power Law																					
Beta	2.955728973																					
Lambda	8.58E-12																					
q	0.933694115																					
LK Value	-63.4517147																					

(sambungan)

Jenis DT	Model GRP I	Model GRP II																				
DT 3101	<table border="1"><thead><tr><th>FI Function</th><th>Power Law</th></tr></thead><tbody><tr><td>Beta</td><td>0.698737391</td></tr><tr><td>Lambda</td><td>8.83E-03</td></tr><tr><td>q</td><td>1.44E-02</td></tr><tr><td>LK Value</td><td>-80.0473587</td></tr></tbody></table>	FI Function	Power Law	Beta	0.698737391	Lambda	8.83E-03	q	1.44E-02	LK Value	-80.0473587	<table border="1"><thead><tr><th>FI Function</th><th>Power Law</th></tr></thead><tbody><tr><td>Beta</td><td>0.773745453</td></tr><tr><td>Lambda</td><td>4.67E-03</td></tr><tr><td>q</td><td>1.24E-03</td></tr><tr><td>LK Value</td><td>-80.1256791</td></tr></tbody></table>	FI Function	Power Law	Beta	0.773745453	Lambda	4.67E-03	q	1.24E-03	LK Value	-80.1256791
FI Function	Power Law																					
Beta	0.698737391																					
Lambda	8.83E-03																					
q	1.44E-02																					
LK Value	-80.0473587																					
FI Function	Power Law																					
Beta	0.773745453																					
Lambda	4.67E-03																					
q	1.24E-03																					
LK Value	-80.1256791																					
DT 3102	<table border="1"><thead><tr><th>FI Function</th><th>Power Law</th></tr></thead><tbody><tr><td>Beta</td><td>0.663322512</td></tr><tr><td>Lambda</td><td>0.016700301</td></tr><tr><td>q</td><td>1</td></tr><tr><td>LK Value</td><td>-73.6884015</td></tr></tbody></table>	FI Function	Power Law	Beta	0.663322512	Lambda	0.016700301	q	1	LK Value	-73.6884015	<table border="1"><thead><tr><th>FI Function</th><th>Power Law</th></tr></thead><tbody><tr><td>Beta</td><td>0.662785388</td></tr><tr><td>Lambda</td><td>1.68E-02</td></tr><tr><td>q</td><td>1</td></tr><tr><td>LK Value</td><td>-73.6883925</td></tr></tbody></table>	FI Function	Power Law	Beta	0.662785388	Lambda	1.68E-02	q	1	LK Value	-73.6883925
FI Function	Power Law																					
Beta	0.663322512																					
Lambda	0.016700301																					
q	1																					
LK Value	-73.6884015																					
FI Function	Power Law																					
Beta	0.662785388																					
Lambda	1.68E-02																					
q	1																					
LK Value	-73.6883925																					
DT 3106	<table border="1"><thead><tr><th>FI Function</th><th>Power Law</th></tr></thead><tbody><tr><td>Beta</td><td>0.65784303</td></tr><tr><td>Lambda</td><td>6.07E-03</td></tr><tr><td>q</td><td>1</td></tr><tr><td>LK Value</td><td>-27.691249</td></tr></tbody></table>	FI Function	Power Law	Beta	0.65784303	Lambda	6.07E-03	q	1	LK Value	-27.691249	<table border="1"><thead><tr><th>FI Function</th><th>Power Law</th></tr></thead><tbody><tr><td>Beta</td><td>0.65784303</td></tr><tr><td>Lambda</td><td>6.07E-03</td></tr><tr><td>q</td><td>1</td></tr><tr><td>LK Value</td><td>-27.691249</td></tr></tbody></table>	FI Function	Power Law	Beta	0.65784303	Lambda	6.07E-03	q	1	LK Value	-27.691249
FI Function	Power Law																					
Beta	0.65784303																					
Lambda	6.07E-03																					
q	1																					
LK Value	-27.691249																					
FI Function	Power Law																					
Beta	0.65784303																					
Lambda	6.07E-03																					
q	1																					
LK Value	-27.691249																					
DT 680	<table border="1"><thead><tr><th>FI Function</th><th>Power Law</th></tr></thead><tbody><tr><td>Beta</td><td>0.735874493</td></tr><tr><td>Lambda</td><td>1.34E-02</td></tr><tr><td>q</td><td>7.00E-05</td></tr><tr><td>LK Value</td><td>-216.0905941</td></tr></tbody></table>	FI Function	Power Law	Beta	0.735874493	Lambda	1.34E-02	q	7.00E-05	LK Value	-216.0905941	<table border="1"><thead><tr><th>FI Function</th><th>Power Law</th></tr></thead><tbody><tr><td>Beta</td><td>0.744144033</td></tr><tr><td>Lambda</td><td>0.012671082</td></tr><tr><td>q</td><td>2.33E-04</td></tr><tr><td>LK Value</td><td>-216.1271125</td></tr></tbody></table>	FI Function	Power Law	Beta	0.744144033	Lambda	0.012671082	q	2.33E-04	LK Value	-216.1271125
FI Function	Power Law																					
Beta	0.735874493																					
Lambda	1.34E-02																					
q	7.00E-05																					
LK Value	-216.0905941																					
FI Function	Power Law																					
Beta	0.744144033																					
Lambda	0.012671082																					
q	2.33E-04																					
LK Value	-216.1271125																					
DT 786	<table border="1"><thead><tr><th>FI Function</th><th>Power Law</th></tr></thead><tbody><tr><td>Beta</td><td>2.457924242</td></tr><tr><td>Lambda</td><td>1.06E-09</td></tr><tr><td>q</td><td>0.626428974</td></tr><tr><td>LK Value</td><td>-130.359588</td></tr></tbody></table>	FI Function	Power Law	Beta	2.457924242	Lambda	1.06E-09	q	0.626428974	LK Value	-130.359588	<table border="1"><thead><tr><th>FI Function</th><th>Power Law</th></tr></thead><tbody><tr><td>Beta</td><td>2.397329235</td></tr><tr><td>Lambda</td><td>1.06E-09</td></tr><tr><td>q</td><td>1</td></tr><tr><td>LK Value</td><td>-130.516133</td></tr></tbody></table>	FI Function	Power Law	Beta	2.397329235	Lambda	1.06E-09	q	1	LK Value	-130.516133
FI Function	Power Law																					
Beta	2.457924242																					
Lambda	1.06E-09																					
q	0.626428974																					
LK Value	-130.359588																					
FI Function	Power Law																					
Beta	2.397329235																					
Lambda	1.06E-09																					
q	1																					
LK Value	-130.516133																					
DT 787	<table border="1"><thead><tr><th>FI Function</th><th>Power Law</th></tr></thead><tbody><tr><td>Beta</td><td>2.005157092</td></tr><tr><td>Lambda</td><td>7.51E-07</td></tr><tr><td>q</td><td>1</td></tr><tr><td>LK Value</td><td>-73.0001698</td></tr></tbody></table>	FI Function	Power Law	Beta	2.005157092	Lambda	7.51E-07	q	1	LK Value	-73.0001698	<table border="1"><thead><tr><th>FI Function</th><th>Power Law</th></tr></thead><tbody><tr><td>Beta</td><td>2.075283724</td></tr><tr><td>Lambda</td><td>8.61E-07</td></tr><tr><td>q</td><td>0.817935398</td></tr><tr><td>LK Value</td><td>-72.2894858</td></tr></tbody></table>	FI Function	Power Law	Beta	2.075283724	Lambda	8.61E-07	q	0.817935398	LK Value	-72.2894858
FI Function	Power Law																					
Beta	2.005157092																					
Lambda	7.51E-07																					
q	1																					
LK Value	-73.0001698																					
FI Function	Power Law																					
Beta	2.075283724																					
Lambda	8.61E-07																					
q	0.817935398																					
LK Value	-72.2894858																					

Lampiran 3: Model GRP-2 Parameter Dengan Weibull ++7

Jenis DT	Model GRP I	Model GRP II																								
DT 3149	<table border="1"> <thead> <tr> <th>GRP</th> <th>Type I</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>FI Function</td> <td>Power Law</td> </tr> <tr> <td>Beta</td> <td>1.491095794</td> </tr> <tr> <td>Lambda</td> <td>7.35E-06</td> </tr> <tr> <td>q</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>LK Value</td> <td>-104.1602247</td> </tr> </tbody> </table>	GRP	Type I	FI Function	Power Law	Beta	1.491095794	Lambda	7.35E-06	q	1	LK Value	-104.1602247	<table border="1"> <thead> <tr> <th>GRP</th> <th>Type I</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>FI Function</td> <td>Power Law</td> </tr> <tr> <td>Beta</td> <td>1.491095794</td> </tr> <tr> <td>Lambda</td> <td>7.35E-06</td> </tr> <tr> <td>q</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>LK Value</td> <td>-104.1602247</td> </tr> </tbody> </table>	GRP	Type I	FI Function	Power Law	Beta	1.491095794	Lambda	7.35E-06	q	1	LK Value	-104.1602247
GRP	Type I																									
FI Function	Power Law																									
Beta	1.491095794																									
Lambda	7.35E-06																									
q	1																									
LK Value	-104.1602247																									
GRP	Type I																									
FI Function	Power Law																									
Beta	1.491095794																									
Lambda	7.35E-06																									
q	1																									
LK Value	-104.1602247																									
DT 3150	<table border="1"> <thead> <tr> <th>FI Function</th> <th>Power Law</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Beta</td> <td>1.076587428</td> </tr> <tr> <td>Lambda</td> <td>4.41E-04</td> </tr> <tr> <td>q</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>LK Value</td> <td>-111.7959707</td> </tr> </tbody> </table>	FI Function	Power Law	Beta	1.076587428	Lambda	4.41E-04	q	1	LK Value	-111.7959707	<table border="1"> <thead> <tr> <th>FI Function</th> <th>Power Law</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Beta</td> <td>1.076587428</td> </tr> <tr> <td>Lambda</td> <td>4.41E-04</td> </tr> <tr> <td>q</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>LK Value</td> <td>-111.7959707</td> </tr> </tbody> </table>	FI Function	Power Law	Beta	1.076587428	Lambda	4.41E-04	q	1	LK Value	-111.7959707				
FI Function	Power Law																									
Beta	1.076587428																									
Lambda	4.41E-04																									
q	1																									
LK Value	-111.7959707																									
FI Function	Power Law																									
Beta	1.076587428																									
Lambda	4.41E-04																									
q	1																									
LK Value	-111.7959707																									
DT 3151	<table border="1"> <thead> <tr> <th>FI Function</th> <th>Power Law</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Beta</td> <td>0.85232862</td> </tr> <tr> <td>Lambda</td> <td>4.01E-03</td> </tr> <tr> <td>q</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>LK Value</td> <td>-118.9543867</td> </tr> </tbody> </table>	FI Function	Power Law	Beta	0.85232862	Lambda	4.01E-03	q	1	LK Value	-118.9543867	<table border="1"> <thead> <tr> <th>FI Function</th> <th>Power Law</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Beta</td> <td>0.85232862</td> </tr> <tr> <td>Lambda</td> <td>4.01E-03</td> </tr> <tr> <td>q</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>LK Value</td> <td>-118.9543867</td> </tr> </tbody> </table>	FI Function	Power Law	Beta	0.85232862	Lambda	4.01E-03	q	1	LK Value	-118.9543867				
FI Function	Power Law																									
Beta	0.85232862																									
Lambda	4.01E-03																									
q	1																									
LK Value	-118.9543867																									
FI Function	Power Law																									
Beta	0.85232862																									
Lambda	4.01E-03																									
q	1																									
LK Value	-118.9543867																									
DT 3157	<table border="1"> <thead> <tr> <th>FI Function</th> <th>Power Law</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Beta</td> <td>2.613350561</td> </tr> <tr> <td>Lambda</td> <td>2.24E-10</td> </tr> <tr> <td>q</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>LK Value</td> <td>-139.482733</td> </tr> </tbody> </table>	FI Function	Power Law	Beta	2.613350561	Lambda	2.24E-10	q	1	LK Value	-139.482733	<table border="1"> <thead> <tr> <th>FI Function</th> <th>Power Law</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Beta</td> <td>2.613350561</td> </tr> <tr> <td>Lambda</td> <td>2.24E-10</td> </tr> <tr> <td>q</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>LK Value</td> <td>-139.482733</td> </tr> </tbody> </table>	FI Function	Power Law	Beta	2.613350561	Lambda	2.24E-10	q	1	LK Value	-139.482733				
FI Function	Power Law																									
Beta	2.613350561																									
Lambda	2.24E-10																									
q	1																									
LK Value	-139.482733																									
FI Function	Power Law																									
Beta	2.613350561																									
Lambda	2.24E-10																									
q	1																									
LK Value	-139.482733																									
DT 3158	<table border="1"> <thead> <tr> <th>FI Function</th> <th>Power Law</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Beta</td> <td>2.97771123</td> </tr> <tr> <td>Lambda</td> <td>2.18E-12</td> </tr> <tr> <td>q</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>LK Value</td> <td>-34.677509</td> </tr> </tbody> </table>	FI Function	Power Law	Beta	2.97771123	Lambda	2.18E-12	q	1	LK Value	-34.677509	<table border="1"> <thead> <tr> <th>FI Function</th> <th>Power Law</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Beta</td> <td>2.97771123</td> </tr> <tr> <td>Lambda</td> <td>2.18E-12</td> </tr> <tr> <td>q</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>LK Value</td> <td>-34.677509</td> </tr> </tbody> </table>	FI Function	Power Law	Beta	2.97771123	Lambda	2.18E-12	q	1	LK Value	-34.677509				
FI Function	Power Law																									
Beta	2.97771123																									
Lambda	2.18E-12																									
q	1																									
LK Value	-34.677509																									
FI Function	Power Law																									
Beta	2.97771123																									
Lambda	2.18E-12																									
q	1																									
LK Value	-34.677509																									
DT 3073	<table border="1"> <thead> <tr> <th>FI Function</th> <th>Power Law</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Beta</td> <td>1.272771308</td> </tr> <tr> <td>Lambda</td> <td>6.88E-05</td> </tr> <tr> <td>q</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>LK Value</td> <td>-80.099681</td> </tr> </tbody> </table>	FI Function	Power Law	Beta	1.272771308	Lambda	6.88E-05	q	1	LK Value	-80.099681	<table border="1"> <thead> <tr> <th>FI Function</th> <th>Power Law</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Beta</td> <td>1.272771308</td> </tr> <tr> <td>Lambda</td> <td>6.88E-05</td> </tr> <tr> <td>q</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>LK Value</td> <td>-80.099681</td> </tr> </tbody> </table>	FI Function	Power Law	Beta	1.272771308	Lambda	6.88E-05	q	1	LK Value	-80.099681				
FI Function	Power Law																									
Beta	1.272771308																									
Lambda	6.88E-05																									
q	1																									
LK Value	-80.099681																									
FI Function	Power Law																									
Beta	1.272771308																									
Lambda	6.88E-05																									
q	1																									
LK Value	-80.099681																									
DT 3075	<table border="1"> <thead> <tr> <th>FI Function</th> <th>Power Law</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Beta</td> <td>2.17915462</td> </tr> <tr> <td>Lambda</td> <td>1.45E-08</td> </tr> <tr> <td>q</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>LK Value</td> <td>-120.710918</td> </tr> </tbody> </table>	FI Function	Power Law	Beta	2.17915462	Lambda	1.45E-08	q	1	LK Value	-120.710918	<table border="1"> <thead> <tr> <th>FI Function</th> <th>Power Law</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Beta</td> <td>2.17915462</td> </tr> <tr> <td>Lambda</td> <td>1.45E-08</td> </tr> <tr> <td>q</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>LK Value</td> <td>-120.710918</td> </tr> </tbody> </table>	FI Function	Power Law	Beta	2.17915462	Lambda	1.45E-08	q	1	LK Value	-120.710918				
FI Function	Power Law																									
Beta	2.17915462																									
Lambda	1.45E-08																									
q	1																									
LK Value	-120.710918																									
FI Function	Power Law																									
Beta	2.17915462																									
Lambda	1.45E-08																									
q	1																									
LK Value	-120.710918																									

(sambungan)

Jenis DT	Model GRP I	Model GRP II																				
DT 3076	<table border="1"><thead><tr><th>FI Function</th><th>Power Law</th></tr></thead><tbody><tr><td>Beta</td><td>1.72622803</td></tr><tr><td>Lambda</td><td>1.03E-06</td></tr><tr><td>q</td><td>1</td></tr><tr><td>LK Value</td><td>-63.891837</td></tr></tbody></table>	FI Function	Power Law	Beta	1.72622803	Lambda	1.03E-06	q	1	LK Value	-63.891837	Belum bisa diolah krn data ga cukup										
FI Function	Power Law																					
Beta	1.72622803																					
Lambda	1.03E-06																					
q	1																					
LK Value	-63.891837																					
DT 3183	<table border="1"><thead><tr><th>FI Function</th><th>Power Law</th></tr></thead><tbody><tr><td>Beta</td><td>1.363899331</td></tr><tr><td>Lambda</td><td>2.28E-05</td></tr><tr><td>q</td><td>1</td></tr><tr><td>LK Value</td><td>-65.91583347</td></tr></tbody></table>	FI Function	Power Law	Beta	1.363899331	Lambda	2.28E-05	q	1	LK Value	-65.91583347	<table border="1"><thead><tr><th>FI Function</th><th>Power Law</th></tr></thead><tbody><tr><td>Beta</td><td>1.363899331</td></tr><tr><td>Lambda</td><td>2.28E-05</td></tr><tr><td>q</td><td>1</td></tr><tr><td>LK Value</td><td>-65.91583347</td></tr></tbody></table>	FI Function	Power Law	Beta	1.363899331	Lambda	2.28E-05	q	1	LK Value	-65.91583347
FI Function	Power Law																					
Beta	1.363899331																					
Lambda	2.28E-05																					
q	1																					
LK Value	-65.91583347																					
FI Function	Power Law																					
Beta	1.363899331																					
Lambda	2.28E-05																					
q	1																					
LK Value	-65.91583347																					
DT 3184	<table border="1"><thead><tr><th>FI Function</th><th>Power Law</th></tr></thead><tbody><tr><td>Beta</td><td>1.553065285</td></tr><tr><td>Lambda</td><td>4.54E-06</td></tr><tr><td>q</td><td>1</td></tr><tr><td>LK Value</td><td>-95.4252392</td></tr></tbody></table>	FI Function	Power Law	Beta	1.553065285	Lambda	4.54E-06	q	1	LK Value	-95.4252392	<table border="1"><thead><tr><th>FI Function</th><th>Power Law</th></tr></thead><tbody><tr><td>Beta</td><td>1.553065285</td></tr><tr><td>Lambda</td><td>4.54E-06</td></tr><tr><td>q</td><td>1</td></tr><tr><td>LK Value</td><td>-95.4252392</td></tr></tbody></table>	FI Function	Power Law	Beta	1.553065285	Lambda	4.54E-06	q	1	LK Value	-95.4252392
FI Function	Power Law																					
Beta	1.553065285																					
Lambda	4.54E-06																					
q	1																					
LK Value	-95.4252392																					
FI Function	Power Law																					
Beta	1.553065285																					
Lambda	4.54E-06																					
q	1																					
LK Value	-95.4252392																					
DT 3085	<table border="1"><thead><tr><th>FI Function</th><th>Power Law</th></tr></thead><tbody><tr><td>Beta</td><td>1.226555346</td></tr><tr><td>Lambda</td><td>1.55E-04</td></tr><tr><td>q</td><td>1</td></tr><tr><td>LK Value</td><td>-129.370299</td></tr></tbody></table>	FI Function	Power Law	Beta	1.226555346	Lambda	1.55E-04	q	1	LK Value	-129.370299	<table border="1"><thead><tr><th>FI Function</th><th>Power Law</th></tr></thead><tbody><tr><td>Beta</td><td>1.226555346</td></tr><tr><td>Lambda</td><td>1.55E-04</td></tr><tr><td>q</td><td>1</td></tr><tr><td>LK Value</td><td>-129.370299</td></tr></tbody></table>	FI Function	Power Law	Beta	1.226555346	Lambda	1.55E-04	q	1	LK Value	-129.370299
FI Function	Power Law																					
Beta	1.226555346																					
Lambda	1.55E-04																					
q	1																					
LK Value	-129.370299																					
FI Function	Power Law																					
Beta	1.226555346																					
Lambda	1.55E-04																					
q	1																					
LK Value	-129.370299																					
DT 3086	<table border="1"><thead><tr><th>FI Function</th><th>Power Law</th></tr></thead><tbody><tr><td>Beta</td><td>1.04495009</td></tr><tr><td>Lambda</td><td>1.10E-03</td></tr><tr><td>q</td><td>1</td></tr><tr><td>LK Value</td><td>-162.480284</td></tr></tbody></table>	FI Function	Power Law	Beta	1.04495009	Lambda	1.10E-03	q	1	LK Value	-162.480284	<table border="1"><thead><tr><th>FI Function</th><th>Power Law</th></tr></thead><tbody><tr><td>Beta</td><td>1.04495009</td></tr><tr><td>Lambda</td><td>1.10E-03</td></tr><tr><td>q</td><td>1</td></tr><tr><td>LK Value</td><td>-162.480284</td></tr></tbody></table>	FI Function	Power Law	Beta	1.04495009	Lambda	1.10E-03	q	1	LK Value	-162.480284
FI Function	Power Law																					
Beta	1.04495009																					
Lambda	1.10E-03																					
q	1																					
LK Value	-162.480284																					
FI Function	Power Law																					
Beta	1.04495009																					
Lambda	1.10E-03																					
q	1																					
LK Value	-162.480284																					
DT 3087	<table border="1"><thead><tr><th>FI Function</th><th>Power Law</th></tr></thead><tbody><tr><td>Beta</td><td>2.520102867</td></tr><tr><td>Lambda</td><td>3.28E-10</td></tr><tr><td>q</td><td>1</td></tr><tr><td>LK Value</td><td>-64.7175344</td></tr></tbody></table>	FI Function	Power Law	Beta	2.520102867	Lambda	3.28E-10	q	1	LK Value	-64.7175344	<table border="1"><thead><tr><th>FI Function</th><th>Power Law</th></tr></thead><tbody><tr><td>Beta</td><td>2.520102867</td></tr><tr><td>Lambda</td><td>3.28E-10</td></tr><tr><td>q</td><td>1</td></tr><tr><td>LK Value</td><td>-64.7175344</td></tr></tbody></table>	FI Function	Power Law	Beta	2.520102867	Lambda	3.28E-10	q	1	LK Value	-64.7175344
FI Function	Power Law																					
Beta	2.520102867																					
Lambda	3.28E-10																					
q	1																					
LK Value	-64.7175344																					
FI Function	Power Law																					
Beta	2.520102867																					
Lambda	3.28E-10																					
q	1																					
LK Value	-64.7175344																					
DT 3099	<table border="1"><thead><tr><th>FI Function</th><th>Power Law</th></tr></thead><tbody><tr><td>Beta</td><td>2.921680058</td></tr><tr><td>Lambda</td><td>8.58E-12</td></tr><tr><td>q</td><td>1</td></tr><tr><td>LK Value</td><td>-63.5162779</td></tr></tbody></table>	FI Function	Power Law	Beta	2.921680058	Lambda	8.58E-12	q	1	LK Value	-63.5162779	<table border="1"><thead><tr><th>FI Function</th><th>Power Law</th></tr></thead><tbody><tr><td>Beta</td><td>2.921680058</td></tr><tr><td>Lambda</td><td>8.58E-12</td></tr><tr><td>q</td><td>1</td></tr><tr><td>LK Value</td><td>-63.5162779</td></tr></tbody></table>	FI Function	Power Law	Beta	2.921680058	Lambda	8.58E-12	q	1	LK Value	-63.5162779
FI Function	Power Law																					
Beta	2.921680058																					
Lambda	8.58E-12																					
q	1																					
LK Value	-63.5162779																					
FI Function	Power Law																					
Beta	2.921680058																					
Lambda	8.58E-12																					
q	1																					
LK Value	-63.5162779																					

(sambungan)

Jenis DT	Model GRP I	Model GRP II																				
DT 3101	<table border="1"><thead><tr><th>FI Function</th><th>Power Law</th></tr></thead><tbody><tr><td>Beta</td><td>0.827461264</td></tr><tr><td>Lambda</td><td>4.32E-03</td></tr><tr><td>q</td><td>1</td></tr><tr><td>LK Value</td><td>-80.41954241</td></tr></tbody></table>	FI Function	Power Law	Beta	0.827461264	Lambda	4.32E-03	q	1	LK Value	-80.41954241	<table border="1"><thead><tr><th>FI Function</th><th>Power Law</th></tr></thead><tbody><tr><td>Beta</td><td>0.827461264</td></tr><tr><td>Lambda</td><td>4.32E-03</td></tr><tr><td>q</td><td>1</td></tr><tr><td>LK Value</td><td>-80.41954241</td></tr></tbody></table>	FI Function	Power Law	Beta	0.827461264	Lambda	4.32E-03	q	1	LK Value	-80.41954241
FI Function	Power Law																					
Beta	0.827461264																					
Lambda	4.32E-03																					
q	1																					
LK Value	-80.41954241																					
FI Function	Power Law																					
Beta	0.827461264																					
Lambda	4.32E-03																					
q	1																					
LK Value	-80.41954241																					
DT 3102	<table border="1"><thead><tr><th>FI Function</th><th>Power Law</th></tr></thead><tbody><tr><td>Beta</td><td>0.663322512</td></tr><tr><td>Lambda</td><td>0.016700301</td></tr><tr><td>q</td><td>1</td></tr><tr><td>LK Value</td><td>-73.6884015</td></tr></tbody></table>	FI Function	Power Law	Beta	0.663322512	Lambda	0.016700301	q	1	LK Value	-73.6884015	<table border="1"><thead><tr><th>FI Function</th><th>Power Law</th></tr></thead><tbody><tr><td>Beta</td><td>0.663322512</td></tr><tr><td>Lambda</td><td>0.016700301</td></tr><tr><td>q</td><td>1</td></tr><tr><td>LK Value</td><td>-73.6884015</td></tr></tbody></table>	FI Function	Power Law	Beta	0.663322512	Lambda	0.016700301	q	1	LK Value	-73.6884015
FI Function	Power Law																					
Beta	0.663322512																					
Lambda	0.016700301																					
q	1																					
LK Value	-73.6884015																					
FI Function	Power Law																					
Beta	0.663322512																					
Lambda	0.016700301																					
q	1																					
LK Value	-73.6884015																					
DT 3106	<table border="1"><thead><tr><th>FI Function</th><th>Power Law</th></tr></thead><tbody><tr><td>Beta</td><td>0.65784303</td></tr><tr><td>Lambda</td><td>6.07E-03</td></tr><tr><td>q</td><td>1</td></tr><tr><td>LK Value</td><td>-27.691249</td></tr></tbody></table>	FI Function	Power Law	Beta	0.65784303	Lambda	6.07E-03	q	1	LK Value	-27.691249	<table border="1"><thead><tr><th>FI Function</th><th>Power Law</th></tr></thead><tbody><tr><td>Beta</td><td>0.65784303</td></tr><tr><td>Lambda</td><td>6.07E-03</td></tr><tr><td>q</td><td>1</td></tr><tr><td>LK Value</td><td>-27.691249</td></tr></tbody></table>	FI Function	Power Law	Beta	0.65784303	Lambda	6.07E-03	q	1	LK Value	-27.691249
FI Function	Power Law																					
Beta	0.65784303																					
Lambda	6.07E-03																					
q	1																					
LK Value	-27.691249																					
FI Function	Power Law																					
Beta	0.65784303																					
Lambda	6.07E-03																					
q	1																					
LK Value	-27.691249																					
DT 680	<table border="1"><thead><tr><th>FI Function</th><th>Power Law</th></tr></thead><tbody><tr><td>Beta</td><td>1.144236436</td></tr><tr><td>Lambda</td><td>5.98E-04</td></tr><tr><td>q</td><td>1</td></tr><tr><td>LK Value</td><td>-218.383222</td></tr></tbody></table>	FI Function	Power Law	Beta	1.144236436	Lambda	5.98E-04	q	1	LK Value	-218.383222	<table border="1"><thead><tr><th>FI Function</th><th>Power Law</th></tr></thead><tbody><tr><td>Beta</td><td>1.144236436</td></tr><tr><td>Lambda</td><td>5.98E-04</td></tr><tr><td>q</td><td>1</td></tr><tr><td>LK Value</td><td>-218.383222</td></tr></tbody></table>	FI Function	Power Law	Beta	1.144236436	Lambda	5.98E-04	q	1	LK Value	-218.383222
FI Function	Power Law																					
Beta	1.144236436																					
Lambda	5.98E-04																					
q	1																					
LK Value	-218.383222																					
FI Function	Power Law																					
Beta	1.144236436																					
Lambda	5.98E-04																					
q	1																					
LK Value	-218.383222																					
DT 786	<table border="1"><thead><tr><th>FI Function</th><th>Power Law</th></tr></thead><tbody><tr><td>Beta</td><td>2.397329235</td></tr><tr><td>Lambda</td><td>1.06E-09</td></tr><tr><td>q</td><td>1</td></tr><tr><td>LK Value</td><td>-130.5161325</td></tr></tbody></table>	FI Function	Power Law	Beta	2.397329235	Lambda	1.06E-09	q	1	LK Value	-130.5161325	<table border="1"><thead><tr><th>FI Function</th><th>Power Law</th></tr></thead><tbody><tr><td>Beta</td><td>2.397329235</td></tr><tr><td>Lambda</td><td>1.06E-09</td></tr><tr><td>q</td><td>1</td></tr><tr><td>LK Value</td><td>-130.5161325</td></tr></tbody></table>	FI Function	Power Law	Beta	2.397329235	Lambda	1.06E-09	q	1	LK Value	-130.5161325
FI Function	Power Law																					
Beta	2.397329235																					
Lambda	1.06E-09																					
q	1																					
LK Value	-130.5161325																					
FI Function	Power Law																					
Beta	2.397329235																					
Lambda	1.06E-09																					
q	1																					
LK Value	-130.5161325																					
DT 787	<table border="1"><thead><tr><th>FI Function</th><th>Power Law</th></tr></thead><tbody><tr><td>Beta</td><td>2.005157092</td></tr><tr><td>Lambda</td><td>7.51E-07</td></tr><tr><td>q</td><td>1</td></tr><tr><td>LK Value</td><td>-73.0001698</td></tr></tbody></table>	FI Function	Power Law	Beta	2.005157092	Lambda	7.51E-07	q	1	LK Value	-73.0001698	<table border="1"><thead><tr><th>FI Function</th><th>Power Law</th></tr></thead><tbody><tr><td>Beta</td><td>2.005157092</td></tr><tr><td>Lambda</td><td>7.51E-07</td></tr><tr><td>q</td><td>1</td></tr><tr><td>LK Value</td><td>-73.0001698</td></tr></tbody></table>	FI Function	Power Law	Beta	2.005157092	Lambda	7.51E-07	q	1	LK Value	-73.0001698
FI Function	Power Law																					
Beta	2.005157092																					
Lambda	7.51E-07																					
q	1																					
LK Value	-73.0001698																					
FI Function	Power Law																					
Beta	2.005157092																					
Lambda	7.51E-07																					
q	1																					
LK Value	-73.0001698																					