RELIABILITY BLOCK DIAGRAM SEBAGAI ASSET HEALTH MANAGEMENT DALAM PENENTUAN KEPUTUSAN O&M DAN CAPITAL INVESTMENT
(STUDI KASUS PT. PLN INDONESIA POWER UBP MRICA)

LAPORAN TUGAS AKHIR

LAPORAN INI DISUSUN UNTUK MEMENUHI SALAH SATU SYARAT MEMPEROLEH GELAR SARJANA STRATA SATU (S1) PADA PROGRAM STUDI TEKNIK INDUSTRI FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG SEMARANG

DISUSUN OLEH:

KANDA SEPTIAN ANUGRAH
NIM 31602200121

PROGRAM STUDI TEKNIK INDUSTRI
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG
SEMARANG 2025

FINAL PROJECT

RELIABILITY BLOCK DIAGRAM AS A HEALTH MANAGEMENT ASSET IN DETERMINING O&M AND CAPITAL INVESTMENT DECISIONS. (CASE STUDY PT. PLN INDONESIA POWER UBP MRICA)

Proposed to complete the requirement to obtain a bachelor's degree (S1) at Department of Industrial Engineering, Faculty of Industrial Technology, Universitas Islam Sultan Agung

Arranged By:

KANDA SEPTIAN ANUGRAH

NIM 31602200121

DEPARTMENT OF INDUSTRIAL ENGINEERING

FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY

UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG SEMARANG

AGUSTUS 2025

LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING

Laporan Tugas Akhir dengan judul "**RELIABILITY BLOCK DIAGRAM SEBAGAI ASSET HEALTH MANAGEMENT DALAM PENENTUAN KEPUTUSAN O&M DAN CAPITAL INVESTMENT. (STUDI KASUS PT. PLN INDONESIA POWER UBP MRICA)**" ini disusun oleh :

Nama	: Kanda Septian Anugrah
NIM	: 31602200121
Program Studi	: Teknik Industri

Telah disahkan oleh dosen pembimbing pada

Hari :

Tanggal :

Pembimbing I

Akhmad Syakhroni, ST., M. Eng

NIDN : 0616037601

Mengetahui,

Ketua Program Studi Teknik Industri

Wiwiek Fatmawati, ST., M.Eng.

NIDN. 0630128601

LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI

Laporan Tugas Akhir dengan judul "**RELIABILITY BLOCK DIAGRAM SEBAGAI ASSET HEALTH MANAGEMENT DALAM PENENTUAN KEPUTUSAN O&M DAN CAPITAL INVESTMENT. (STUDI KASUS PT. PLN INDONESIA POWER UBP MRICA)**" ini telah dipertahankan di depan dosen penguji Tugas Akhir pada:

Hari :

Tanggal :

TIM PENGUJI

Penguji I	Penguji II
Ir. Eli Mas'idah, MT	Rieska Ernawati, ST., MT
NIDN : 0615066601	NIDN :0608099201

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : Kanda Septian Anugrah

NIM : 31602200121

Judul Tugas Akhir : RELIABILITY BLOCK DIAGRAM SEBAGAI ASSET HEALTH MANAGEMENT DALAM PENENTUAN KEPUTUSAN O&M DAN CAPITAL INVESTMENT. (STUDI KASUS PT. PLN INDONESIA POWER UBP MRICA)

Dengan bahwa ini saya menyatakan bahwa judul dan isi Tugas Akhir yang saya buat dalam rangka menyelesaikan Pendidikan Strata Satu (S1) Teknik Industri tersebut adalah asli dan belum pernah diangkat, ditulis ataupun dipublikasikan oleh siapapun baik keseluruhan maupun sebagian, kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebutkan dalam daftar pustaka, dan apabila di kemudian hari ternyata terbukti bahwa judul Tugas Akhir tersebut pernah diangkat, ditulis ataupun dipublikasikan, maka saya bersedia dikenakan sanksi akademis. Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sadar dan penuh tanggung jawab.

Semarang, 25 Agustus 2025

Yang Menyatakan

Kanda Septian Anugrah

PERNYATAAN PERSETUJUAN

PUBLIKASI KARYA ILMIAH

Saya yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : Kanda Septian Anugrah

NIM : 31602200121

Program Studi : Teknik Industri

Fakultas : Teknologi industri

Dengan ini menyatakan Karya Ilmiah berupa Tugas akhir dengan Judul :

RELIABILITY BLOCK DIAGRAM SEBAGAI ASSET HEALTH MANAGEMENT DALAM PENENTUAN KEPUTUSAN O&M DAN CAPITAL INVESTMENT. (STUDI KASUS PT. PLN INDONESIA POWER UBP MRICA)

Menyetujui menjadi hak milik Universitas Islam Sultan Agung serta memberikan Hak bebas Royalti Non-Eksklusif untuk disimpan, dialihmediakan, dikelola dan pangkalan data dan dipublikasikan di internet dan media lain untuk kepentingan akademis selama tetap mencantumkan nama penulis sebagai pemilik hak cipta. Pernyataan ini saya buat dengan sungguh-sungguh. Apabila dikemudian hari terbukti ada pelanggaran Hak Cipta/Plagiarisme dalam karya ilmiah ini, maka segala bentuk tuntutan hukum yang timbul akan saya tanggung secara pribadi tanpa melibatkan Universitas Islam Sultan agung.

Semarang, 25 Agustus 2025

Yang Menyatakan

Kanda Septian Anugrah

HALAMAN PERSEMBAHAN

بِسْمِ ٱللَّهِ ٱلرَّحْمَٰنِ ٱلرَّحِيمِ

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah ﷻ atas segala limpahan rahmat, karunia, dan hidayah-Nya, shalawat dan salam semoga tercurah pada junjungan kita, Nabi Besar Muhammad ﷺ yang syafaatnya kita nantikan kelak di hari akhir, sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan tugas akhir ini dengan judul:

"*Reliability Block Diagram* sebagai *Asset Health Management* dalam Penentuan Keputusan O&M dan *Capital Investment* (Studi Kasus PT PLN Indonesia Power UBP Mrica)"

Tugas akhir ini penulis persembahkan dengan setulus hati kepada:

- ✓ **Kedua orang tua tercinta**, yang selalu memberikan doa, dukungan moral, kasih sayang, dan semangat tiada henti dalam setiap langkah hidup penulis.
- ✓ **Bapak/Ibu Dosen dan seluruh civitas akademika Universitas Islam Sultan Agung**, khususnya di Program Studi Teknik Industri, yang telah membimbing dan memberikan ilmu yang sangat berharga selama masa studi.
- ✓ **Rekan-rekan seperjuangan Teknik Industri**, yang telah menjadi bagian dari perjalanan penuh kenangan dan semangat dalam menyelesaikan pendidikan ini.
- ✓ **Tim dan seluruh jajaran di PT PLN Indonesia Power UBP Mrica**, yang telah memberikan kesempatan dan dukungan dalam pelaksanaan penelitian ini.

Semoga karya sederhana ini dapat memberikan manfaat dan menjadi kontribusi kecil bagi pengembangan ilmu pengetahuan dan praktik pemeliharaan aset pembangkit di Indonesia.

Semarang, 25 Agustus 2025

Penulis

HALAMAN MOTTO

"Sesungguhnya Allah mencintai apabila salah seorang di antara kalian mengerjakan suatu pekerjaan, maka ia menyempurnakannya."

— (HR. Al-Baihaqi)

"Barang siapa yang menempuh jalan untuk mencari ilmu, maka Allah akan mudahkan baginya jalan menuju surga."

— (HR. Muslim)

"Sebaik-baik manusia adalah yang paling bermanfaat bagi manusia lain."

— (HR. Ahmad, Ath-Thabrani, dan Ad-Daruquthni)

"Kesuksesan bukan hanya milik mereka yang pintar, tetapi milik mereka yang pantang menyerah."

— B.J. Habibie

KATA PENGANTAR

بِسْمِ ٱللَّهِ ٱلرَّحْمَٰنِ ٱلرَّحِيمِ

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah ﷻ atas limpahan rahmat, karunia, dan hidayah-Nya shalawat dan salam semoga tercurah pada junjungan kita, Nabi Besar Muhammad ﷺ yang syafaatnya kita nantikan kelak di hari akhir, sehingga penulis dapat menyelesaikan penyusunan Tugas Akhir dengan judul:

"Reliability Block Diagram sebagai Asset Health Management dalam Penentuan Keputusan O&M dan Capital Investment (Studi Kasus PT PLN Indonesia Power UBP Mrica)"

Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan program studi Sarjana Teknik Industri di Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Sultan Agung. Dalam proses penyusunan tugas akhir ini, penulis menyadari bahwa keberhasilan ini tidak lepas dari bantuan, bimbingan, dan dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, dengan segala kerendahan hati, penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

- **Allah** ﷻ, atas segala nikmat dan kekuatan yang diberikan selama proses penyusunan tugas akhir ini.
- **Kedua orang tua tercinta**, atas doa, kasih sayang, dan semangat yang tak pernah berhenti mengalir.
- **Bapak Akhmad Syakhroni, ST., M. Eng**. selaku dosen pembimbing, atas bimbingan, arahan, dan koreksi yang sangat membantu dalam penyusunan tugas akhir ini.
- **Seluruh dosen dan staf pengajar Teknik Industri Universitas Islam Sultan Agung**, atas ilmu dan wawasan yang telah diberikan selama masa perkuliahan.
- **Pihak PT PLN Indonesia Power UBP Mrica**, atas kesempatan dan dukungan yang telah diberikan selama proses pengambilan data dan observasi lapangan.
- **Rekan-rekan seperjuangan Teknik Industri**, atas kebersamaan, motivasi, dan bantuan selama proses studi.

Penulis menyadari bahwa tugas akhir ini masih jauh dari sempurna, oleh karena itu saran dan kritik yang membangun sangat penulis harapkan demi perbaikan ke depannya.

Semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat dan kontribusi bagi pengembangan ilmu pengetahuan dan praktik manajemen keandalan di bidang ketenagalistrikan.

Semarang, 25 Agustus 2025

Penulis

DAFTAR ISI

RELIABILITY BLOCK DIAGRAM SEBAGAI ASSET HEALTH MANAGEMENT DALAM PENENTUAN KEPUTUSAN O&M DAN CAPITAL INVESTMENT i
(STUDI KASUS PT. PLN INDONESIA POWER UBP MRICA) (BAHASA INDONESIA) i
HALAMAN JUDUL (BAHASA INGGRIS) ii
LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING iii
LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI iv
SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR v
PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH vi
HALAMAN PERSEMBAHAN vii
HALAMAN MOTTO viii
KATA PENGANTAR ix
DAFTAR ISI xi
DAFTAR TABEL xv
DAFTAR GAMBAR xvi
DAFTAR LAMPIRAN xvii
DAFTAR ISTILAH xxi
ABSTRAK xxiii
ABSTRACT xxiv
BAB I PENDAHULUAN 25
1.1 Latar Belakang 25
1.2 Perumusan Masalah 26
1.3 Pembatasan Masalah 27
1.4 Tujuan 27
1.5 Manfaat 28
1.6 Sistematika Penulisan 28
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI 30
2.1 Tinjauan Pustaka 30
2.2 Landasan Teori 41
2.2.1 *Maintenance* 41
2.2.2 Pengertian Keandalan (*Reliability*) 42

2.2.3 Perbedaan *Reliability* dan Kualitas 44
2.2.4 Fungsi Distribusi kerusakan (*Failure Distribution*) 45
2.2.5 Fungsi Kepadatan Peluang 45
2.2.6 Fungsi Kepadatan Kumulatif 46
2.2.7 Fungsi Reliabilitas 46
2.2.8 *System & Equipment Reliability Prioritization* (SERP) 47
2.2.9 *Mean Time Between Failure* (MTBF) 51
2.2.10 *Mean Time To Repair* (MTTR) 51
2.2.11 *Mean Time to failure* (MTTF) 51
2.2.12 Laju Kegagalan (*Failure Rate*) 51
2.2.13 Karakteristik Kegagalan 52
2.2.14 Distribusi Kegagalan *Weibull* 53
2.2.15 *Reliability System* 54
2.3 Hiptesis dan Kerangka Teoritis 56
2.3.1 Hipotesis 56
2.3.2 Kerangka Teoritis 56
BAB III METODE PENELITIAN 59
3.1 Objek Penelitian 59
3.2 Teknik Pengumpulan Data 60
3.2.1 Data Primer 60
3.2.2 Data Sekunder 63
3.3 Pengujian Hipotesa 64
3.4 Metode Analisis 64
3.5 Pembahasan 65
3.5.1 Keandalan Sistem 66
3.5.2 Analisis *Weibull* 66
3.5.3 Prioritas Pemeliharaan 66
3.6 Penarikan Kesimpulan 67
3.7 Diagram Alir 68
BAB IV HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN 69
4.1 Pengumpulan Data 69
4.1.1 Data Primer 69
4.1.2 Data Sekunder 70

4.1.3 Pengolahan data MTBF, MTTR & MTTF 71
4.1.4 Modeling *Reliability Block Diagram* (RBD) 74
4.1.5 Analisis *Weilbull* 78
4.1.6 Evaluasi Asset dengan Metode SERP dan MPI 79
4.2 Pengolahan Data 85
4.2.1 Deskripsi Data Historis 86
4.2.2 Pemodelan *Reliability Block Diagram* (RBD) 87
4.2.3 Perhitungan Parameter *Weibull* 92
4.2.4 Evaluasi *System and Equipment Criticality* (SCR dan ECR) 98
4.2.5 Perhitungan Asset Criticality Ranking (ACR) 99
4.2.6 Penentuan *Maintenance Priority Index* (MPI) 101
4.3 Analisa dan Interpretasi 102
4.3.1 *Power intake* PLTA Sidorejo 104
4.3.2 *Power Intake* PLTA Siteki 105
4.3.3 *Power intake* PLTA Tulis 106
4.3.4 *Penstock* PLTA Lambur 106
4.3.5 *Excitation System (emerson)* PLTA Garung Unit 1 107
4.3.6 *Power Intake* PLTA PB. Soedirman 108
4.3.7 *Feeder Express 20 KV GB03* PLTA Sempor 108
4.3.8 *JTM 20 KV* PLTA Tapen 109
4.3.9 *Excitation & AVR Control* PLTA Plumbungan 110
4.3.10 *Excitation & AVR Control* PLTA Siteki 111
4.3.11 *Inlat Valve Assembly* PLTA Plumbungan 112
4.3.12 *PLC Governor* PLTA Tulis unit 1 112
4.3.13 *PLC Governor* PLTA Tulis unit 2 113
4.3.14 *Circuit Breaker* PLTA Siteki 114
4.3.15 *Governor Hydrauik System* PLTA Kedungombo 115
4.3.16 *Main Control Panels* PLTA Siteki 116
4.4 Pembuktian hipotesa 117
BAB V 120
BAB V PENUTUPAN 120
5.1 Kesimpulan 120
5.2 Saran 120

DAFTA PUSTAKA 122
LAMPIRAN 124

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 : Tinjauan Pustaka 35
Tabel 2. 2 : Kriteria Safety 49
Tabel 2. 3 : Kriteria Environmental 49
Tabel 2. 4 : Kriteria Cost 49
Tabel 2. 5 : Kriteria Commercial Availability 50
Tabel 2. 6 : Kriteria Efficiency 50
Tabel 3. 1 : Jumlah Asset Per Unit Pembangkit 61
Tabel 3. 2 : Jam Operasi unit Pembangkit 62
Tabel 4. 1 : Top MTBF Terkecil Setiap Unit Pembangkit 72
Tabel 4. 2 : Rangkuman RBD Nilai Terendah 77
Tabel 4. 3 : Contoh Evaluasi SCR 81
Tabel 4. 4 : Contoh Evaluasi ECR 82
Tabel 4. 5 : ACR & ACR Rank 84
Tabel 4. 6 : ACR & MPI 85
Tabel 4. 7 : Hasil Evaluasi RBD Asset-Aset yang mempengaruhi nilai RDB terkecil 90
Tabel 4. 8 : Data Failur Asset Guide Vane Ketenger Unit 3 pada Maximo 93
Tabel 4. 9 : Perhitungan Weilbull Guide Vane Ketenger unit 3 94
Tabel 4. 10 : Perhitungan Ulang Weilbull Guide Vane Ketenger unit 3 95
Tabel 4. 11 : Hasil Weibull Analysis 44 Asset 96
Tabel 4. 12 : ACR Rank PLTA PB. Soeditman Unit 1 100
Tabel 4. 13 : Skor Condition Status dan Repair Status 102
Tabel 4. 14 : ACR MPI Rank PLTA Gunung Wugul Common 102
Tabel 4. 15 : Hasil Pengolahan Data Aset-aset Masuk Kriteria Prioritas 103
Tabel 4. 16 : List Asset Prioritas hasil Analisa 104
Tabel 4. 17 : Perbandingan metode awal (ACR & MPI) dengan Metode Baru (RBD) 118

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1 : Wilayah Kerja PT PLN Indonesia Power UBP Mrica 26
Gambar 2. 1 : Kurva Laju Kegagalan 52
Gambar 2. 2 : RBD Serial 55
Gambar 2. 3 : RBD Paralel 55
Gambar 2. 4 : Flow Chat Langkah Kerja 58
Gambar 3. 1 : Data Asset di Maximo 60
Gambar 3. 2 : Spesifikasi Asset di Maximo 63
Gambar 3. 3 : Diagram Alir Metode Analisis 68
Gambar 4. 1 : RBD System PLTA Sidorejo 74
Gambar 4. 2 : RBD Lubricating Equipment PLTA Sidorejo 75
Gambar 4. 3 : Data Maximo Hystorical Brake Down Asset 79

DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN 1 :INFORMASI LIST ASSET RAM ANALISYS PLTA GARUNG 124
LAMPIRAN 2 : INFORMASI LIST ASSET RAM ANALISYS PLTA JELOK 127
LAMPIRAN 3 : INFORMASI LIST ASSET RAM ANALISYS PLTA KEDUNG OMBO 134
LAMPIRAN 4 : INFORMASI LIST ASSET RAM ANALISYS PLTA KETENGER 136
LAMPIRAN 5 : INFORMASI LIST ASSET RAM ANALISYS PLTA LAMBUR 142
LAMPIRAN 6 : INFORMASI LIST ASSET RAM ANALISYS PLTA PB. SOEDIRMAN 144
LAMPIRAN 7 : INFORMASI LIST ASSET RAM ANALISYS PLTA PEJENGKOLAN 149
LAMPIRAN 8 : INFORMASI LIST ASSET RAM ANALISYS PLTA SEMPOR 151
LAMPIRAN 9 : INFORMASI LIST ASSET RAM ANALISYS PLTA SIDOREJO 153
LAMPIRAN 10 : INFORMASI LIST ASSET RAM ANALISYS PLTA SITEKI 154
LAMPIRAN 11 : INFORMASI LIST ASSET RAM ANALISYS PLTA TIMO 156
LAMPIRAN 12 : INFORMASI LIST ASSET RAM ANALISYS PLTA TULIS 160
LAMPIRAN 13 : INFORMASI LIST ASSET RAM ANALISYS PLTA WADASLINTANG 163
LAMPIRAN 14 : INFORMASI LIST ASSET RAM ANALISYS PLTA WONOGIRI 166
LAMPIRAN 15 : INFORMASI LIST ASSET RAM ANALISYS PLTA KLAMBU 169
LAMPIRAN 16 : INFORMASI LIST ASSET RAM ANALISYS PLTA PLUMBUNGAN 170
LAMPIRAN 17 : INFORMASI LIST ASSET RAM ANALISYS PLTA TAPEN 172
LAMPIRAN 18 : RBD PLTA GARUNG 174
LAMPIRAN 19 : RBD PLTA JELOK 175
LAMPIRAN 20 : RBD PLTA KEDUNG OMBO 177
LAMPIRAN 21 : RBD PLTA KETENGER 182
LAMPIRAN 22 : RBD PLTA LAMBUR 187
LAMPIRAN 23 : RBD PLTA PB. SOEDIRMAN 189
LAMPIRAN 24 : RBD PLTA PEJENGKOLAN 192
LAMPIRAN 25 : RBD PLTA SEMPOR 193
LAMPIRAN 26 : RBD PLTA SIDOREJO 194
LAMPIRAN 27 : RBD PLTA SITEKI 197
LAMPIRAN 28 : RBD PLTA TIMO 203
LAMPIRAN 29 : RBD PLTA TULIS 205
LAMPIRAN 30 : RBD PLTA WADASLINTANG 210
LAMPIRAN 31 : RBD PLTA WONOGIRI 214
LAMPIRAN 32 : RBD PLTA KLAMBU 216
LAMPIRAN 33 : RBD PLTA PLUMBUNGAN 219
LAMPIRAN 34 : RBD PLTA TAPEN 226
LAMPIRAN 35 : WEIBULL ANALYSIS ASSET FEEDER EXPRESS 30 KV SEMPOR 234
LAMPIRAN 36 : WEIBULL ANALYSIS ASSET JTM 20 KV TAPEN 235
LAMPIRAN 37 : WEIBULL ANALYSIS ASSET POWER INTAKE PB. SOEDIRMAN 236
LAMPIRAN 38 : WEIBULL ANALYSIS ASSET CIRCUIT BRAKER SITEKI 237
LAMPIRAN 39 : WEIBULL ANALYSIS ASSET EXCITATION & AVR PLUMBUNGAN 238
LAMPIRAN 40 : WEIBULL ANALYSIS ASSET GOVERNOR OIL SUMP & PRESSURE TANK KETENGER UNIT 4 239
LAMPIRAN 41 : WEIBULL ANALYSIS ASSET COOLING WATER STRAINER TULIS 240
LAMPIRAN 42 : WEIBULL ANALYSIS ASSET GUIDE VANE SITEKI 241
LAMPIRAN 43 : WEIBULL ANALYSIS ASSET THRUST BEARING TULIS UNIT 1 242
LAMPIRAN 44 : WEIBULL ANALYSIS ASSET EXCITATION &AVR SITEKI 243
LAMPIRAN 45 : WEIBULL ANALYSIS ASSET BEARING LUBRICATING TAPEN 244
LAMPIRAN 46 : WEIBULL ANALYSIS ASSET PLC GOVERNOR TULIS UNIT 1 245
LAMPIRAN 47 : WEIBULL ANALYSIS ASSET GUIDE VANE TULIS UNIT 1 246

LAMPIRAN 48 : WEIBULL ANALYSIS ASSET THRUST BEARING TULIS UNIT 2 247
LAMPIRAN 49 : WEIBULL ANALYSIS ASSET COOLING WATER STRAINER PLUMBUNGAN 248
LAMPIRAN 50 : WEIBULL ANALYSIS ASSET MAIN CONTROL PANEL SITEKI 249
LAMPIRAN 51 : WEIBULL ANALYSIS ASSET POWER INTAKE TULIS 250
LAMPIRAN 52 : WEIBULL ANALYSIS ASSET SUMPWELL PUMP SITEKI 251
LAMPIRAN 53 : WEIBULL ANALYSIS ASSET EXCITATION SYSTEM (EMERSON) GARUNG UNIT 2 252
LAMPIRAN 54 : WEIBULL ANALYSIS ASSET PLC GOVErNOR TULIS UNIT 2 253
LAMPIRAN 55 : WEIBULL ANALYSIS ASSET PROTECTION EQUIPMENT UNIT CONTROL & PROTECTION SYSTEM LAMBUR UNIT 2 254
LAMPIRAN 56 : WEIBULL ANALYSIS ASSET GOVERNOR SUMPTANK & PUMP SITEKI 255
LAMPIRAN 57 : WEIBULL ANALYSIS ASSET GUIDE VANE TULIS UNIT 2 256
LAMPIRAN 58 : WEIBULL ANALYSIS ASSET INLET VALVE PLUMBUNGAN 257
LAMPIRAN 59 : WEIBULL ANALYSIS ASSET GOVERNOR HYDRAULIC SYSTEM KEDUNGOMBO 258
LAMPIRAN 60 : WEIBULL ANALYSIS ASSET GUIDE VANE KETENGER UNIT 3 259
LAMPIRAN 61 : WEIBULL ANALYSIS ASSET MODUL GOVERNOR TAPEN 260
LAMPIRAN 62 : WEIBULL ANALYSIS ASSET POWER INTAKE SITEKI 261
LAMPIRAN 63 : WEIBULL ANALYSIS ASSET POWER INTAKE SIDOREJO 262
LAMPIRAN 64 : EVALUASI SERP MPI GARUNG UNIT 1 263
LAMPIRAN 65 : EVALUASI SERP MPI GARUNG UNIT 2 264
LAMPIRAN 66 : EVALUASI SERP MPI GARUNG COMMON 265
LAMPIRAN 67 : EVALUASI SERP MPI GUNUNG WUGUL UNIT 1 266
LAMPIRAN 68 : EVALUASI SERP MPI GUNUNG WUGUL UNIT 2 267
LAMPIRAN 69 : EVALUASI SERP MPI GUNUNG WUGUL COMMON 268
LAMPIRAN 70 : EVALUASI SERP MPI GUNUNG JELOK COMMON 269
LAMPIRAN 71 : EVALUASI SERP MPI GUNUNG JELOK UNIT 1 270
LAMPIRAN 72 : EVALUASI SERP MPI GUNUNG JELOK UNIT 2 271
LAMPIRAN 73 : EVALUASI SERP MPI GUNUNG JELOK UNIT 3 272
LAMPIRAN 74 : EVALUASI SERP MPI GUNUNG JELOK UNIT 4 273
LAMPIRAN 75 : EVALUASI SERP MPI KEDUNGOMBO 274
LAMPIRAN 76 : EVALUASI SERP MPI KETENGER COMMON 275
LAMPIRAN 77 : EVALUASI SERP MPI KETENGER UNIT 1 276
LAMPIRAN 78 : EVALUASI SERP MPI KETENGER UNIT 2 277
LAMPIRAN 79 : EVALUASI SERP MPI KETENGER UNIT 3 278
LAMPIRAN 80 : EVALUASI SERP MPI KETENGER UNIT 4 279
LAMPIRAN 81 : EVALUASI SERP MPI KLAMBU 280
LAMPIRAN 82 : EVALUASI SERP MPI LAMBUR 281
LAMPIRAN 83 : EVALUASI SERP MPI PB. SOEDIRMAN UNIT 1 282
LAMPIRAN 84 : EVALUASI SERP MPI PB. SOEDIRMAN UNIT 2 283
LAMPIRAN 85 : EVALUASI SERP MPI PB. SOEDIRMAN UNIT 3 284
LAMPIRAN 86 : EVALUASI SERP MPI PB. SOEDIRMAN COMMON 285
LAMPIRAN 87 : EVALUASI SERP MPI PEJENGKOLAN 286
LAMPIRAN 88 : EVALUASI SERP MPI SEMPOR 287
LAMPIRAN 89 : EVALUASI SERP MPI SIDOREJO 288
LAMPIRAN 90 : EVALUASI SERP MPI TAPEN 289
LAMPIRAN 91 : EVALUASI SERP MPI SITEKI 290
LAMPIRAN 92 : EVALUASI SERP MPI PLUMBUNGAN 291
LAMPIRAN 93 : EVALUASI SERP MPI TIMO COMMON 292

LAMPIRAN 94 : EVALUASI SERP MPI TIMO UNIT 1 293
LAMPIRAN 95 : EVALUASI SERP MPI TIMO UNIT 2 294
LAMPIRAN 96 : EVALUASI SERP MPI TIMO UNIT 3 295
LAMPIRAN 97 : EVALUASI SERP MPI TULIS UNIT 1 296
LAMPIRAN 98 : EVALUASI SERP MPI TULIS UNIT 2 297
LAMPIRAN 99 : EVALUASI SERP MPI TULIS COMMON 298
LAMPIRAN 100 : EVALUASI SERP MPI WADASLINTANG UNIT 1 299
LAMPIRAN 101 : EVALUASI SERP MPI WADASLINTANG UNIT 2 300
LAMPIRAN 102 : EVALUASI SERP MPI WADASLINTANG COMMON 301
LAMPIRAN 103 : EVALUASI SERP MPI WONOGIRI COMMON 302
LAMPIRAN 104 : EVALUASI SERP MPI WONOGIRI UNIT 1 303
LAMPIRAN 105 : EVALUASI SERP MPI WONOGIRI UNIT 2 304
LAMPIRAN 106 : ACR Rank PLTA PB. Soedirman Common 305
LAMPIRAN 107 : ACR Rank PLTA PB. Soedirman Unit 1 307
LAMPIRAN 108 : ACR Rank PLTA PB. Soedirman Unit 2 308
LAMPIRAN 109 : ACR Rank PLTA PB. Soedirman Unit 3 309
LAMPIRAN 110 : ACR Rank PLTA Garung Common 310
LAMPIRAN 111 : ACR Rank PLTA Garung Unit 1 312
LAMPIRAN 112 : ACR Rank PLTA Garung Unit 2 313
LAMPIRAN 113 : ACR Rank PLTA Jelok Common 314
LAMPIRAN 114 : ACR Rank PLTA Jelok Unit 1 316
LAMPIRAN 115 : ACR Rank PLTA Jelok Unit 2 317
LAMPIRAN 116 : ACR Rank PLTA Jelok Unit 3 318
LAMPIRAN 117 : ACR Rank PLTA Jelok Unit 4 319
LAMPIRAN 118 : ACR Rank PLTA Kedungombo 320
LAMPIRAN 119 : ACR Rank PLTA Ketenger Common 322
LAMPIRAN 120 : ACR Rank PLTA Ketenger Unit 1 324
LAMPIRAN 121 : ACR Rank PLTA Ketenger Unit 2 325
LAMPIRAN 122 : ACR Rank PLTA Ketenger Unit 3 326
LAMPIRAN 123 : ACR Rank PLTA Ketenger Unit 4 327
LAMPIRAN 124 : ACR Rank PLTA Klambu 328
LAMPIRAN 125 : ACR Rank PLTA Pejengkolan 329
LAMPIRAN 126 : ACR Rank PLTA Sempor 331
LAMPIRAN 127 : ACR Rank PLTA Sidorejo 333
LAMPIRAN 128 : ACR Rank PLTA Timo Common 334
LAMPIRAN 129 : ACR Rank PLTA Timo Unit 1 335
LAMPIRAN 130 : ACR Rank PLTA Timo Unit 2 336
LAMPIRAN 131 : ACR Rank PLTA Timo Unit 3 337
LAMPIRAN 132 : ACR Rank PLTA Tapen 338
LAMPIRAN 133 : ACR Rank PLTA Siteki 339
LAMPIRAN 134 : ACR Rank PLTA Plumbungan 340
LAMPIRAN 135 : ACR Rank PLTA Tulis Common 341
LAMPIRAN 136 : ACR Rank PLTA Tulis Unit 1 342
LAMPIRAN 137 : ACR Rank PLTA Tulis Unit 2 343
LAMPIRAN 138 : ACR Rank PLTA Wadaslintang Common 344
LAMPIRAN 139 : ACR Rank PLTA Wadaslintang Unit 1 345
LAMPIRAN 140 : ACR Rank PLTA Wadaslintang Unit 2 346
LAMPIRAN 141 : ACR Rank PLTA Wonogiri Common 347
LAMPIRAN 142 : ACR Rank PLTA Wonogiri Unit 1 348
LAMPIRAN 143 : ACR Rank PLTA Wonogiri Unit 2 349

LAMPIRAN 144 : ACR Rank PLTA Gunung Wugul Common 350
LAMPIRAN 145 : ACR Rank PLTA Gunung Wugul Unit 1 351
LAMPIRAN 146 : ACR Rank PLTA Gunung Wugul Unit 2 352
LAMPIRAN 147 : ACR Rank PLTA Lambur Common 353
LAMPIRAN 148 : ACR Rank PLTA Lambur Unit 1 354
LAMPIRAN 149 : ACR Rank PLTA Lambur Unit 2 355

UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG
UNISSULA
جامعة سلطان أجونج الإسلامية

DAFTAR ISTILAH

Istilah	Kepanjangan / Definisi
AHM	*Asset Health Management* – Strategi pengelolaan siklus hidup aset untuk memastikan kinerja optimal dan keandalan jangka panjang.
ACR	*Asset Criticality Rating* – Peringkat tingkat kekritisan aset berdasarkan dampak dan perannya dalam sistem pembangkit.
APF / AFPF	*Asset (Failure) Probability Factor* – Faktor probabilitas kegagalan suatu aset berdasarkan data historis atau estimasi risiko.
ERP Maximo	*Enterprise Resource Planning Maximo* – Sistem perangkat lunak yang digunakan PLN Indonesia Power untuk pengelolaan aset dan pemeliharaan.
IRR	*Internal Rate of Return* – Tingkat pengembalian investasi yang digunakan dalam evaluasi kelayakan finansial proyek.
MTBF	*Mean Time Between Failure* – Waktu rata-rata antara dua kegagalan berturut-turut pada suatu sistem atau komponen.
MTTR	*Mean Time To Repair* – Waktu rata-rata yang dibutuhkan untuk memperbaiki suatu peralatan setelah mengalami kerusakan.
MTTF	*Mean Time To Failure* – Rata-rata waktu sebelum suatu komponen mengalami kegagalan pertama kali.
NPV	*Net Present Value* – Selisih antara nilai sekarang dari arus kas masuk dan keluar suatu proyek investasi.
O&M	*Operation and Maintenance* – Operasi dan pemeliharaan, termasuk semua aktivitas untuk menjaga dan mengoperasikan peralatan.
PI	*Profitability Index* – Rasio antara nilai sekarang dari arus kas masuk dengan nilai investasi awal; digunakan untuk menilai profitabilitas proyek.
RBD	*Reliability Block Diagram* – Diagram pemodelan keandalan yang menggambarkan konfigurasi logis komponen dalam suatu sistem.
RCM	*Reliability Centered Maintenance* – Strategi pemeliharaan berbasis keandalan untuk mengoptimalkan efektivitas dan efisiensi operasional.
R(t)	*Reliability Function* – Fungsi probabilitas bahwa suatu sistem atau komponen akan berfungsi hingga waktu t.
SCR	*System Criticality Rating* – Peringkat tingkat kekritisan sistem dalam mendukung fungsi utama pembangkit.
SERP	*System and Equipment Reliability Prioritization* – Metode pemeringkatan keandalan untuk menentukan prioritas pemeliharaan dan investasi.

Istilah	Kepanjangan / Definisi
Weibull Distribution	Distribusi statistik yang digunakan untuk memodelkan waktu kegagalan suatu komponen, tergantung pada parameter skala dan bentuk.
PLTA	Pembangkit Listrik Tenaga Air
MPI	*Maintenance Priority Index*
ECR	*Equipment Criticality Rating*
CMMS	*Computerized Maintenance Management System*
RCA	*Root Cause Analysis*
CB	*Circuit Breaker*
PLC	*Programmable Logic Controller*
AVR	*Automatic Voltage Regulator*
CAPEX	*Capital Expenditure*
PM	*Preventive Maintenance*
η (eta)	Parameter skala *Weibull* (waktu karakteristik kegagalan)
β (beta)	Parameter bentuk *Weibull* (pola kegagalan)
R(t)	*Reliability* atau keandalan terhadap waktu t
λ	Laju kegagalan *(failure rate)* satuan 1/jam
T	Waktu operasi atau waktu hingga kegagalan
F(t)	*Cumulative distribution function*
h(t)	*Hazard function* (fungsi laju bahaya)
RS	*Repair Status*
CS	*Condition Status*

ABSTRAK

Tingginya usia rata-rata aset pembangkit listrik tenaga air (PLTA) PT PLN Indonesia Power UBP Mrica yang mencapai 36 tahun menjadi tantangan dalam menjaga keandalan dan kontinuitas operasional sistem. Metode prioritisasi yang saat ini digunakan, yaitu *Asset Critical Rank* (ACR), masih terbatas pada tingkat unit dan belum mampu menggambarkan hubungan antarkomponen secara menyeluruh. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, penelitian ini mengusulkan pendekatan *Reliability Block Diagram* (RBD) sebagai alat evaluasi keandalan sistem secara komprehensif, dengan mempertimbangkan konfigurasi seri dan paralel pada komponen pembangkit. Metodologi yang digunakan mencakup integrasi *System & Equipment Reliability Prioritization* (SERP), perhitungan *Asset Criticality Ranking* (ACR), dan analisis *Weibull* untuk memperoleh parameter keandalan seperti MTBF, MTTR, dan *failure rate*. Hasil penelitian menunjukkan identifikasi aset-aset kritis dengan nilai reliabilitas rendah ($R < 0,7$) serta prioritas intervensi berbasis nilai ACR dan *Maintenance Priority Index* (*MPI*). Kesimpulannya, penerapan metode RBD dan *Weibull Analysis* terbukti efektif dalam mendukung pengambilan keputusan O&M dan investasi yang lebih tepat sasaran, serta berkontribusi dalam pencapaian target *High Quality Growth* (HQG) perusahaan.

Kata kunci: Keandalan Aset, *Reliability Block Diagram* (RBD), *System & Equipment Reliability Prioritization* (SERP), *Weibull Analysis, Asset Criticality Ranking* (ACR), *Maintenance Priority Index* (MPI), Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA), *High Quality Growth* (HQG)

.

ABSTRACT

This study aims to enhance the effectiveness of decision-making in operation and maintenance (O&M) activities and capital investment planning for hydroelectric power systems managed by PT PLN Indonesia Power UBP Mrica. With the average asset age reaching 36 years, maintaining asset reliability has become a major challenge in ensuring operational continuity. Currently, the Asset Critical Rank (ACR) method used only supports prioritization at the unit level, which lacks a comprehensive view. Therefore, this study proposes the use of the Reliability Block Diagram (RBD) approach to evaluate system reliability holistically. RBD enables modeling of functional relationships between generation components, both in series and parallel, to identify critical failure points and support data-driven decision-making. The study integrates RBD with the System & Equipment Reliability Prioritization (SERP) method and Weibull analysis to calculate key reliability parameters such as Mean Time Between Failure (MTBF), Mean Time To Repair (MTTR), and failure rate. The results of this study are expected to provide strategic recommendations for asset health management, reduce maintenance costs, and support the achievement of High Quality Growth (HQG).

.

Keywords: Asset Reliability, Reliability Block Diagram (RBD), System & Equipment Reliability Prioritization (SERP), Weibull Analysis, Asset Criticality Ranking (ACR), Maintenance Priority Index (MPI), Hydroelectric Power Plant (HPP), High Quality Growth (HQG).

BAB I

PENDAHULUAN

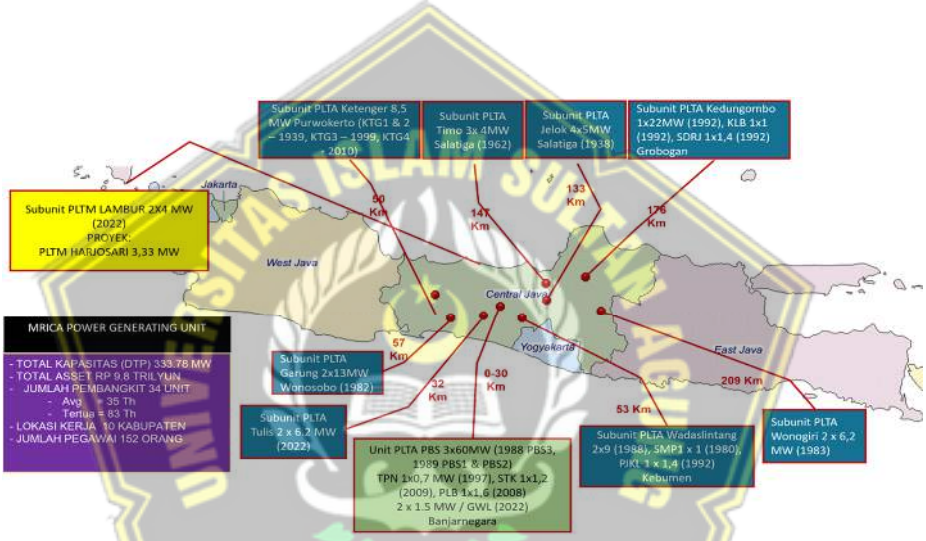
1.1 Latar Belakang

PLN Indonesia Power merupakan salah satu *subholding* perusahaan pembangkit listrik PT PLN (Persero) yang memiliki peran strategis dalam menyediakan pasokan listrik di Indonesia. Sejak didirikan pada tahun 1995 dengan nama PT PJB I, perusahaan ini telah mengalami transformasi besar-besaran, termasuk perubahan nama menjadi Indonesia Power pada tahun 2000 dan akhirnya menjadi PLN Indonesia Power pada tahun 2022. Saat ini, PLN Indonesia Power tercatat sebagai perusahaan pembangkit terbesar di Asia Tenggara dengan total kapasitas mencapai 21,08 GW. Salah satu unit bisnisnya, Unit Bisnis Pembangkitan (UBP) Mrica, mengelola pembangkit listrik tenaga air (PLTA) yang tersebar di Jawa Tengah dengan 34 unit mesin dan total daya terpasang 333,78 MW.

Dalam upaya mendukung visi PLN menjadi *Top 500 Global Companies*, PLN Indonesia Power berkomitmen untuk mencapai *High Quality Growth* (HQG). Salah satu tantangan utama dalam mencapai target ini adalah menjaga keandalan (*reliability*) aset pembangkit yang sebagian besar telah beroperasi selama rata-rata 36 tahun. Dengan total 2.161 aset yang tersebar di UBP Mrica, diperlukan strategi pemeliharaan (*Operation & Maintenance/O&M*) dan investasi modal (*Capital Investment*) yang optimal untuk memastikan kesehatan aset tetap terjaga.

Saat ini, prioritisasi pemeliharaan dan investasi dilakukan menggunakan *metode Asset Critical Rank* (ACR). Namun, metode ini hanya diterapkan pada level unit mesin pembangkit, sehingga belum mampu memberikan gambaran menyeluruh untuk ke-34 mesin yang ada. Hal ini mengakibatkan ketidakpastian dalam menentukan prioritas pemeliharaan dan alokasi investasi, yang berpotensi memengaruhi kinerja pembangkit secara keseluruhan. Selain itu, tingginya usia aset dan kompleksitas sistem pembangkit menuntut pendekatan yang lebih komprehensif untuk mengidentifikasi aset-aset kritis yang memerlukan perhatian khusus.

Apabila kondisi ini tidak segera ditangani, risiko yang mungkin timbul adalah peningkatan biaya pemeliharaan, penurunan efisiensi operasi, serta berkurangnya kemampuan perusahaan dalam mendukung target strategis High Quality Growth (HQG). Oleh karena itu, diperlukan suatu kajian yang mampu menjawab permasalahan mendasar, yaitu bagaimana mengidentifikasi aset-aset kritis yang benar-benar berpengaruh terhadap keandalan sistem pembangkit. Hasil kajian ini diharapkan dapat menjadi dasar dalam pengambilan keputusan pemeliharaan dan investasi yang lebih efektif serta berorientasi pada keberlanjutan..



Gambar 1. 1 : Wilayah Kerja PT PLN Indonesia Power UBP Mrica

Diharapkan, hasil penelitian ini tidak hanya meningkatkan keandalan aset tetapi juga mendukung pencapaian target *High Quality Growth* melalui pengurangan biaya operasional dan peningkatan pendapatan (*revenue*). Selain itu, penelitian ini juga dapat menjadi referensi bagi pengembangan strategi pemeliharaan dan investasi di sektor pembangkit listrik lainnya di Indonesia.

1.2 Perumusan Masalah

Bersadarkan latar belakang di atas, penulis dapat merumuskan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana mengidentifikasi dan mengevaluasi keandalan unit-unit pembangkit di UBP Mrica secara sistematis dan menyeluruh, mengingat usia rata-rata aset yang sudah tua?

2. Bagaimana penerapan *Reliability Block Diagram* (RBD) dapat membantu dalam menentukan strategi pemeliharaan (*Operation & Maintenance/O&M*) yang efektif dan efisien?
3. Bagaimana integrasi antara RBD dan metode SERP dapat mendukung pengambilan keputusan berbasis data dalam pengelolaan kesehatan aset (*Asset Health Management*)?
4. Bagaimana metode RBD dapat digunakan untuk memprioritaskan investasi modal (*Capital Investment*) terhadap aset-aset pembangkit yang memiliki tingkat kritikalitas tinggi?

1.3 Pembatasan Masalah

Dalam penelitian ini terdapat beberapa batasan masalah supaya tujuan awal penelitian tidak menyimpang, diantaranya yaitu :

1. Penelitian ditujukan hanya pada asset-asset Pembangkit Listrik di PT. PLN Indonesia Power UBP Mrica
2. Data penelitian hanya diambil dari *historical Enterprise Resource Planning* (Maximo).
3. Data penelitian yang digunakan terdiri dari observasi dan wawancara atau *interview* kepada pihak terkait di PT. PLN Indonesia Power UBP Mrica.

1.4 Tujuan

Tujuan dilakukannya penelitian ini adalah:

1. Mengidentifikasi dan mengevaluasi keandalan unit pembangkit di PT PLN Indonesia Power UBP Mrica secara menyeluruh menggunakan pendekatan *Reliability Block Diagram* (RBD).
2. Menyusun strategi pemeliharaan (*Operation & Maintenance*) berbasis keandalan guna meningkatkan efektivitas dan efisiensi operasional.
3. Mengintegrasikan metode RBD dengan pendekatan SERP (*System & Equipment Reliability Prioritization*) untuk mendukung pengambilan keputusan dalam pengelolaan kesehatan aset (*Asset Health Management*).
4. Menentukan prioritas *Capital Investment* terhadap aset pembangkit berdasarkan tingkat keandalan dan kritikalitasnya.

1.5 Manfaat

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

A. Mahasiswa
   - Memberikan peluang bagi penulis untuk mengaplikasikan teori teori yang sudah dipelajari.
   - Sebagai salah satu syarat dan kewajiban dalam menempuh ujian akhir sarjana di fakultas teknologi industri untuk meraih gelar sarjana.

B. Universitas
   - Menambah khasanah penelitian di bidang manajemen pemeliharaan dan keandalan sistem.
   - Mendorong terwujudnya budaya penelitian kajian keilmuan dan metode pembelajaran berbasis studi kasus industri.

C. Perusahaan
   - Memberikan informasi mengenai kesehatan asset-asset pembangkit, dalam menjaga keandalan pembangkit.
   - Memberikan usulan prioritasi penentuan asset-asset pembangkit yang akan *Capital Investment* dengan menekan biaya dan meningkatkan *revenue*.
   - Mendukung pencapaian target perusahaan dalam mewujudkan *High Quality Growth* (HQG) melalui pengelolaan aset yang lebih terukur dan berkelanjutan

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika yang digunakan dalam penulisan penelitian ini mengikuti aturan standar baku penulisan tugas akhir mahasiswa. Penulisan tugas akhir ini dibuat dalam lima bab yang memberikan gambaran sistematis sejak awal penelitian hingga tercapainya tujuan penelitian.

BAB I PENDAHULUAN

Bab pertama merupakan pendahuluan yang berisikan latar belakang, perumusan masalah, diagram keterkaitan masalah, batasan penelitian,

tujuan, manfaat penelitian serta sitematika penulisan. Bab ini membahas penyusunan masalah dari keseluruhan penelitian yang merupakan tahap pertama dalam penelitian ini.

BAB II LANDASAN TEORI

Bab ini membahas literatur yang relevan dengan topik penelitian serta konsep dan teori yang menjadi dasar dalam melakukan analisis. Fokus utama dalam bab ini adalah pembahasan mengenai konsep *Reliability Block Diagram* (RBD), prinsip-prinsip keandalan (*reliability*), metode *System & Equipment Reliability Prioritization* (SERP), serta parameter-parameter teknik seperti MTBF, MTTR, dan *failure rate*. Selain itu, disertakan pula ulasan berbagai studi terdahulu yang relevan sebagai pembanding dan penguat argumen metodologis penelitian.

BAB III METODE PENELITIAN

Bab ini menguraikan pendekatan dan metode yang digunakan dalam penelitian. Penjelasan mencakup objek penelitian di PT. PLN Indonesia Power UBP Mrica, teknik pengumpulan data (baik primer dari ERP Maximo maupun sekunder dari manual dan referensi peralatan), serta metode analisis data yang meliputi pemodelan RBD, analisis *Weibull*, dan integrasi dengan SERP. Diagram alir proses penelitian juga disajikan untuk mempermudah pemahaman alur kerja penelitian.

BAB IV HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Bab ini menyajikan hasil dari proses analisis data, termasuk perhitungan keandalan sistem, identifikasi titik-titik kritis aset pembangkit, serta usulan strategi pemeliharaan dan alokasi investasi. Hasil dihitung berdasarkan model RBD dan indikator keandalan seperti MTBF dan *failure rate*, yang kemudian diinterpretasikan dalam konteks strategi *Asset Health Management*.

BAB V PENUTUP

Bagian kelima merupakan kesimpulan dan saran yang dihasilkan dari keseluruhan penelitian ini. Kesimpulan yang diambil akan meliputi keseluruhan hasil pengolahan data dan hasil kelayakan.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Literatur review atau biasa dengan tinjauan literatur merupakan sumber rujukan yang berisi mengenai uraian teori, temuan dan bahan penelitian lainnya yang diperoleh dari bahan acuan untuk dijadikan landasan dalam kegiatan penelitian.

Literatur pertama ini menyajikan kerangka analisis *Reliability, availability and Maintenability* (RAM) untuk mengevaluasi kinerja *Water Circulating System* (WCS) yang digunakan di pembangkit listrik tenaga batubara (PLTU). Kinerja WCS dievaluasi menggunakan *Reliability Block Diagram* (RBD), *Fault Tree Analysis* (FTA), Dalam penelitian ini, sistem yang diteliti terdiri dari lima subsistem yang dihubungkan secara seri dan paralel *Condensate Extraction Pump* (CEP), *Low-Pressure Feed Water Heater* (LPH), *Deaerator* (DR), dan *Boiler Feed Pump* (BFP) *High-Pressure Feed Water Heater* (HPH). RBD dan FTA digunakan untuk mengevaluasi kinerja WCS.

Hasil studi menunjukkan bahwa BFP memiliki dampak paling besar terhadap ketersediaan sistem, sedangkan kegagalan DR memiliki dampak paling kecil. Untuk meningkatkan ketersediaan sistem, merekomendasikan strategi pemeliharaan yang dimodifikasi berdasarkan parameter ketersediaan yang dioptimalkan *Mean Time Between Failures* (MTBF), *Mean Time To Repair* (MTTR) (Jagtap et al., 2021).

Parameter tingkat kegagalan yang dioptimalkan dan tingkat perbaikan subsistem digunakan untuk mengusulkan strategi pemeliharaan yang tepat untuk sistem sirkulasi air di PLTU. Kerangka kerja RAM yang diusulkan membantu pengambil keputusan untuk merencanakan kegiatan pemeliharaan sesuai dengan tingkat kekritisan subsistem.

Kemudian untuk literasi kedua Pembahasan peralatan Genset pada Perusahaan telekomunikasi. Berdasarkan data, frekuensi kerusakan mesin genset

diesel pada tahun 2017 hingga 2020 sangat tinggi. Dari tahun 2017 hingga hingga tahun 2020, total terjadi 90 kejadian yang penyebab utama kerusakannya adalah mesin *Diesel Deutz* 20 kVA. Untuk mengetahui bagaimana kondisi perawatannya, mengetahui tingkat kinerjanya dan menemukan rekomendasi yang sesuai untuk meningkatkan kinerja mesin *Diesel Generator*. Metodologi penelitian yang digunakan adalah RCM (*Reliability Centered Maintenance*), yaitu teknik yang digunakan untuk mengembangkan pemeliharaan *Preventif* terjadwal.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa bagian yang paling sering mengalami kerusakan pada mesin genset *Deutz Diesel*. Pemilihan ini didasarkan pada *Frekuensi* kegagalan tertinggi dan downtime terlama kurang lebih 3 tahun. Perhitungan nilai *Mean Time To Failed* (MTTF) *Generator* adalah 25,305 jam yang berarti bagian *Generator* akan mengalami kegagalan kembali setelah 25,305 jam beroperasi. Sedangkan nilai *Mean Time to Repair* (MTTR) *Genset* adalah 22,54 jam, artinya rata-rata waktu perbaikan suku cadang genset adalah 22,54 jam. Berdasarkan hasil perhitungan nilai keandalan, generator masih dapat beroperasi dengan baik karena rentang nilai rata-rata selalu berada pada rentang $0 < R > 1$), sehingga jenis perawatan ini sesuai untuk bagian pemeliharaan generator yang bersifat *Preventif* dan *Time Base* (Hakim et al., 2021).

Literas ketiga terkait dengan keandalan, ketersediaan adalah ukuran kinerja sistem dan mengukur efek gabungan dari keandalan, pemeliharaan, dan dukungan logistik terhadap kinerja operasional sistem. Sistem ini terdiri dari beberapa komponen. Sistem mungkin rusak dan tidak dapat digunakan. Agar sistem berfungsi kembali, perbaikan harus dilakukan. Sistem ini terdiri dari tiga komponen: komponen 1 adalah inti prosesor, komponen 2 adalah antarmuka *input/output*, dan komponen 3 adalah memori. Sistem ini disusun secara seri paralel. Artikel ini menggunakan data generasi. Data berupa waktu kegagalan dan waktu perbaikan masing-masing komponen sistem. Oleh karena itu, variabel yang diteliti adalah waktu kegagalan dan waktu perbaikan seluruh komponen sistem. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui rata-rata waktu kegagalan dan waktu perbaikan komponen, keandalan dan ketersediaan sistem.

Hasil kajian keandalan sistem sebesar 0,9998 sedangkan ketersediaan sistem sebesar 0,9987. Hasil ini dapat disimpulkan bahwa sistem mempunyai kualitas terbaik dan kinerja tinggi. Secara umum, semakin tinggi nilai reliabilitas maka kualitas sistem semakin baik dan sempurna, dan jika nilai ketersediaan semakin tinggi maka kinerja sistem akan semakin baik (Santoso & Anugraheni, 2018).

Literasi selanjutnya pada PT Krakatau steel Kelancaran suatu proses produksi bergantung pada banyak faktor, salah satunya adalah keandalan mesin di tempat produksi. Semakin tinggi penggunaan mesin dan fasilitas produksi, semakin besar kebutuha pemeliharaan dan servisnya. PT. Krakatau Steel (Persero) Tbk merupakan pabrik baja yang mulai dikembangkan ketika muncul ide akan kebutuhan industri baja di negara berkembang seperti Indonesia. Pabrik CRM merupakan salah satu pabrik milik PT. Krakatau Steel (Persero) Tbk memproduksi pelat baja dengan perlakuan dingin. Strategi komersial yang diterapkan oleh PT.

Krakatau Steel (Persero) Tbk diproduksi sesuai pesanan. Salah satu unit manufaktur yang beroperasi di pabrik CRM adalah unit produksi *Tandem Continuous Cold Mill* (CTCM). Unit produksi ini melakukan proses penarikan dan pengepresan strip baja melalui perlakuan dingin hingga ketebalannya berkurang 92% dibandingkan ketebalan aslinya (sesuai spesifikasi konsumen). Sebagai unit produksi yang besar dan penting, unit produksi CTCM memiliki downtime yang tinggi dibandingkan unit produksi lainnya, yakni 19.177 menit. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menghitung dan menganalisis keandalan unit manufaktur CTCM dengan menggunakan metode *Reliability Diagram* (RBD) dan menghitung nilai keandalan yang diusulkan untuk dipertimbangkan perusahaan dalam melaksanakan perbaikan dan pengembangan lebih lanjut.

Berdasarkan hasil pengolahan data diperoleh dua komponen penting pada unit produksi CTCM yaitu lokasi pabrik dan toko dengan nilai keandalan masing-masing sebesar 32,171% dan 13,123%, sedangkan nilai kepercayaan keseluruhan sebesar 0,3883% bila menggunakan RBD dengan hubungan. antar komponen yang berurutan. Perhitungan keandalan yang diusulkan dilakukan dengan menaikkan

nilai keandalan komponen kritis pada lokasi pabrik dan bengkel sebesar 10% menjadi 42,171% dan 13,123%. Dengan demikian, nilai keandalan yang diusulkan pada unit produksi CTCM adalah 0,897%. Rekomendasi yang dapat diberikan kepada perusahaan untuk meningkatkan keandalan unit produksi CTCM antara lain menerapkan kebijakan pemeliharaan *Preventif* yang meminimalkan kerusakan yang terjadi pada unit produksi CTCM dan terus melakukan pemeriksaan mendalam terhadap mesin sebelum dan sesudah digunakan untuk setiap shift (Ripaldi, 2020).

Suatu komponen/sistem dapat dinyatakan handal apabila dalam kurun waktu tertentu sistem/komponen tersebut beroperasi sesuai fungsinya. Indikator keandalan suatu komponen dapat dilihat dari nilai keandalan yang diperoleh sistem, pengurangan downtime, peningkatan waktu produksi, dan peningkatan nilai ketersediaan. Pada artikel ini, analisis keandalan dilakukan pada sistem perusahaan mobil dalam penelitian tersebut. Seperti PT perusahaan produsen mobil. PT. X mempunyai proses utama pada proses pembuatannya yaitu proses ekstrusi. Pada proses ekstrusi terdapat lima belas mesin yang disusun secara seri. Untuk menganalisis keandalan sistem pada saat ekstrusi digunakan metode grafik keandalan.

Diagram reliabilitas merupakan suatu metode analisis reliabilitas yang dapat menggambarkan hubungan antar sistem, subsistem dan komponen sehingga dapat diketahui komponen/sistem yang mempengaruhi harga keandalan sistem. Tujuan dari penelitian ini adalah memodelkan sistem dengan menggunakan metode diagram keandalan (RBD), mengetahui keandalan keseluruhan sistem dan mengetahui perangkat-perangkat penting. Data yang diolah merupakan data kegagalan mesin pada tahun 2006 hingga tahun 2017, kemudian data tersebut diolah untuk mengetahui keandalan masing-masing komponen. Perangkat lunak yang digunakan adalah perangkat lunak *Reliasoft Blocksim 11*. Perangkat lunak *Reliasoft Blocksim* mampu memodelkan, menganalisis dan mensimulasikan model RBD. Perangkat lunak *Reliasoft Blocksim* menampilkan representasi grafis fleksibel yang mendukung berbagai konfigurasi RBD, khususnya keandalan,

pemeliharaan, ketersediaan, dan alokasi sumber daya. Hasil pencarian ini adalah nilai reliabilitas sistem sebesar 0,00436 atau 0,436 untuk t=100 jam (Rosihan & Yuniarto, 2019).

Tabel 2. 1 : Tinjauan Pustaka

No	Peneliti	Judul Penelitian	Sumber	Permasalahan	Metode	Hasil Penelitian
1	Hanumant P. Jagtap, dkk (2021)	RAM *analysis and availability optimization of thermal power plant water circulation system using PSO*	*Energy Report* (http://www.journals.elsevier.com/energy-reports/)	Permasalah yang terjadi *power plant* PLTU pada peralatan system sirkulasi air, untuk mencari *maintenance strategi* terbaik pada peralatan kritical.	*RAM, RBD*	Melakukan analisa *reliability block diagram* dengan *metode RAM analysis* pada *thermal power plant* untuk melakukan evaluasi pada sistem sirkulasi air sehingga dapat ditentukan *strategi maintenance* berdasarkan tingkat kristis masing-masing peralatan
2	Sunaryo, Japri, Yuhelson, Legisnal Hakim (2021)	Implementasi RCM pada mesin diesel *Deutz* 20 kVA	TURBO Vol. 10 No. 1. 2021 p-ISSN: 2301-6663, e-ISSN: 2477-250X Jurnal Program Studi Teknik Mesin UM Metro	Dari data frekuensi kerusakan pada mesin diesel genset tahun 2017 sampai dengan 2020 yang sangat tinggi. Pada periode tahun 2017 sampai dengan 2020 ada total kerusakan sebanyak 90 kali, dan penyumbang kerusakan terbesar ada di mesin *diesel Deutz* kapasitas 20kVA. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui bagaimana kondisi *maintenance* dan mengetahui tingkat efektivitas serta mengetahui rekomendasi yang tepat untuk meningkatkan efektivitas dari mesin diesel genset tersebut.	*RCM (Reliability Centered maintenance)*	kerusakan pada mesin diesel genset *deutz* adalah *Alternator*. Pemilihan ini didasarkan pada jumlah frekuensi kerusakan tertinggi serta downtime terlama selama kurang lebih 3 tahun. Perhitungan nilai Mean Time to Failure (MTTF) *Alternator* adalah 25305 jam yang artinya komponen *Alternator* akan mengalami kerusakan kembali setelah beroperasi selama 25305 jam. Sedangkan nilai Mean Time to Repair (MTTR) dari Alternator adalah 22,54 jam yang artinya rata-rata waktu untuk perbaikan komponen Alternator selama 22,54 jam. Dari hasil perhitungan Nilai Keandalan, Alternator dikatakan masih memiliki fungsi dengan baik karena interval nilai rata – rata nya masih di range $0 < R(t) < 1$. Dari hasil analisa didapat nilai β sebesar 1,64205. Dengan nilai tersebut ($\beta > 1$) maka jenis pemeliharaan yang sesuai pada komponen *Alternator* adalah *Preventive* dan *Time Based Maintenance*.

3	Sudarno1, Rukun Santoso2, Avida Anugraheni3 (2018)	Reliabilitas Dan Availabilitas Sistem Tiga Komponen Tersusun Paralel Berseri	Statistika, Vol. 6, No. 2, November 2018	Komponen yang rusak dapat beroperasi lagi jika dilakukan perbaikan. Sehingga agar sistem dapat bekerja dengan baik untuk waktu yang lama perlu pemeliharaan komponen. Terdapat dua jenis pemeliharaan (maintenance), yaitu *preventive maintenance* yang bertujuan untuk meningkatkan mesin dan *corrective maintenance* yang bertujuan untuk memperbaiki mesin yang gagal bekerja. Baik saat komponen rusak maupun saat sedang diperbaiki, keduanya membutuhkan waktu, sehingga terdapat waktu kegagalan dan waktu perbaikan	*Reliability, availability, mean time to failure, mean time to repair*	Berdasarkan pembahasan penelitiandidapat kesimpulan bahwa: 1. Distribusi waktu kegagalan berguna untuk mendapatkan reliabilitas sistem, sedangkan untuk mendapatkan availabilitas diperlukan pula distribusi waktu perbaikan. 2. Estimasi parameter berguna untuk mencari rataan waktu kegagalan dan rataan waktu perbaikan. 3. Nilai reliabilitas sistem untuk satu nilai menggunakan rataan waktu kegagalan, dan nilai availabilitas
4	Zulfikri Muhammad R (2020)	Analisa Keandalan unit Produksi *Continuous Tandem Cold Mill* Menggunakan Metode *Reliability Block Diagram*	Jurnal UII (https://dspace.uii.ac.id/handle/123456789/28461;jsessionid=C84469DD613977EEDFF5A976385EAA05)	Berdasarkan hasil pengolahan data, didapat dua komponen kritis pada unit produksi CTCM yaitu lokasi *Mill* dan Exit dengan nilai keandalan masing – masing sebesar 32,171% dan 13,123%, sementara untuk nilai reliability secara keseluruhan sebesar 0,3883% menggunakan RBD dengan hubungan antar komponen yang bersifat seri. Perhitungan *reliability* usulan yang dilakukan yaitu dengan menaikkan nilai *reliability* sebesar 10% pada komponen kritis pada lokasi Mill dan Exit menjadi 42,171% dan 13,123%. Sehingga nilai reliability usulan untuk unit produksi CTCM sebesar 0,897%. Rekomendasi yang dapat diberikan ke perusahaan untuk meningkatkan keandalan pada unit produksi CTCM yaitu dengan menerapkan kebijakan perawatan secara preventif agar mengurangi kerusakan yang timbul pada unit produksi CTCM serta melakukan pemeriksaan mesin secara intensif	*RBD*	Melakukan Analisa *reliability block diagram* pada Perusahaan manufacture dengan menerpakan kebijakan perawatan secara *preventif*.

				sebelum dan setelah penggunaan mesin untuk setiap shift kerja.		
5	Rifda Ilahy Rosihan dan Hari Agung Yuniarto	Analisis Sistem *Reliability* dengan Pendekatan *Reliability Block Diagram*	JURNAL TEKNOSAINS VOL 9, NO.1, Desember 2019; 57-67	Untuk menganalisis *reliability sistem* pada proses *Extrusion* digunakan *metode Reliability Block Diagram*. *Reliability Block Diagram* merupakan salah satu metodeanalisis *reliability* yang dapat mengambarkan hubungan antar sistem, sub-sistem, dan komponen sehingga dapat diketahui komponen/system yang memiliki pengaruh pada nilai reliability sistem. Tujuan dilakukannya penelitian ini adalah memodelkan sistem dengan menggunakan metode *Reliability Block Diagram*, mengetahui *reliability* dari keseluruhan sistem, dan mengetahui *critically equipment*. Data yang diolah merupakan data kerusakan mesin dari tahun 2006-2017, kemudian data tersebut diolah untuk menentukan reliability dari masing-masing komponen., *maintainability, availability*, dan *resources allocation*. Hasil dari penelitian ini adalah nilai *reliability* sistem 0,00436 atau 0,436% dengan t=100 jam.	*Availability; Reliability ; Reliability Analysis; Reliability Block Diagram; Reliasoft Blocksim*	Simpulan yang dapat ditarik dari penelitian ini adalah *Reliability Block Diagram* merupakan salah satu pendekatan yang dapat digunakan untuk melakukan perhitungan *reliability sistem* secara menyeluruh. Model RBD untuk sistem *Extrusion* dapat dilihat pada Software yang digunakan untuk memodelkan RBD adalah *software Reliasoft Blocksim*. *Reliability* pada *system Extrusion* adalah 0,00436 atau 0,436%pada t = 100 jam. Artinya bahwa dalam waktu t=100 jam sistem beroperasi sesuai dengan fungsinya sebesar 0,436%, selebihnya sistem berada kondisi shutdown atau gagal beroperasi. Untuk meningkatkan nilai *reliability* dibutuhkan waktu pengecekan dan perawatan yang lebih pendek sehingga mengurangi adanya kegagalan komponen dan membuat redundancy komponen. *Critical equipment* pada sistem *Extrusion* adalah *Cooling Batch*
6	L. Carnevali, dkk. (Carnevali et al., 2021)	*An Efficient Library for Reliability Block Diagram Evaluation*	Applied Sciences (https://www.mdpi.com)	Perlunya alat yang efisien dan fleksibel untuk evaluasi RBD dalam sistem kompleks secara berlapis.	*Reliability Block Diagram (RBD)*	Mengembangkan pustaka “librbd” untuk evaluasi RBD secara efisien dan akurat, mendukung sistem hierarkis dan evaluasi *prediktif*.
7	Bett B.K., dkk. (2023)(Kipchumba et al., 2023)	*Utilizing Weibull Distribution for Fitting System Data and Time Between Maintenance Operations*	Manuscript, Moi University	Tidak adanya jadwal pemeliharaan yang konsisten menyebabkan kegagalan sistem dan biaya tinggi dalam industri tekstil.	*Weibull Analysis, MTBF Calculation*	*Weibull* digunakan untuk menetapkan pola kegagalan (*wear out, random*), menghasilkan jadwal pemeliharaan berbasis keandalan dan perbaikan efisiensi.

8	P. Szewczyk & A. Łebkowski (2023)	*Reliability Evaluation of Electrochemical Energy Storage Systems Supplying the Ship's Main Propulsion System*	TransNav Journal (Szewczyk & Łebkowski, 2023)	Sistem penyimpanan energi di kapal memiliki kompleksitas tinggi dan memerlukan evaluasi keandalan.	*FMEA, RBD, FTA*	Evaluasi keandalan sistem penyimpanan energi listrik menggunakan RBD dan FTA untuk menentukan titik kritis dan risiko kegagalan.
9	D. Chybowska, S. Guze (2020)	*A Multiphase Process Approach to the Analysis of the Reliability and Safety in Maritime Transport Systems*	TransNav Journal (http://www.transnav.eu) (Guze & Chybowska, 2020)	Sistem transportasi laut yang kompleks membutuhkan pendekatan analisis keandalan multiphase yang mempertimbangkan perbedaan beban dan kondisi tiap fase operasi.	*Reliability Modelling, Fault Tree Analysis*	Mengembangkan pendekatan *multiphase* dalam menganalisis keandalan dan keselamatan sistem transportasi laut, dengan mempertimbangkan ketergantungan antar fase dan lingkungan operasi.
10	D. Fabiánek, dkk. (2021)	*Weibull's Analysis of the Dependability of Critical Components of Selected Agricultural Machinery*	Manufacturing Technology Journal (Fabianek et al., 2021)	Komponen traktor kritis memerlukan evaluasi keandalan untuk merancang kebijakan pemeliharaan optimal.	*Weibull Distribution, Dependability Indicators*	Analisis menggunakan distribusi *Weibull* untuk mengidentifikasi pola kegagalan komponen kritis dan mendukung strategi pemeliharaan biaya-efektif.
11	Widharto et al., (2018)	ANALISIS *HUMAN RELIABILITY ASSESSMENT* DENGAN METODE *HEART* (STUDI KASUS PT ABC)	J@ti Undip: Jurnal Teknik Industri, Vol. 13, No. 3, September 2018	Permasalahan utama pada penelitian ini adalah tingginya risiko kecelakaan kerja di PT ABC yang disebabkan oleh *human error* pada lini perakitan. Hasil analisis dengan metode *HEART* menunjukkan adanya beberapa tugas kritis (7.1, 14.1, dan 16.1) dengan nilai *Human Error Probability* (HEP) = 1, yang menandakan potensi kesalahan sangat tinggi. Hal ini dipicu oleh kompleksitas pekerjaan, waktu deteksi kegagalan yang sangat singkat, keterampilan operator yang terbatas, serta kondisi kerja yang kurang mendukung, seperti ruang kerja sempit, keterbatasan penggunaan APD, dan faktor lingkungan lain yang meningkatkan risiko terjadinya kesalahan.	*Human Error Probability (HEP), HRA (Human Reliability Assessment)*	Tingkat risiko human error di PT ABC cukup tinggi, terutama pada tiga subtask kritis dengan HEP = 1. Oleh karena itu diperlukan pelatihan operator, perbaikan kondisi kerja, penggunaan APD, serta monitoring berkelanjutan untuk mengurangi potensi kecelakaan kerja.

Item	Artikel 1	Artikel 2	Artikel 3	Artikel 4	Artikel 5	Artikel 6	Artikel 7	Artikel 8	Artikel 9	Artikel 10	Artikel 11	Posisi penelitian saat ini
Judul	RAM *analysis and availability optimization of thermal power plant water circulation system using PSO*	Implementasi RCM pada mesin diesel *Deutz* 20 kVA	Reliabilitas Dan Availabilitas Sistem Tiga Komponen Tersusun Paralel Berseri	Analisa Keandalan unit Produksi *Continuos Tandem Cold Mill* Menggundakan Metode Reliability *Block Diagram*	Analisis Sistem Reliability dengan Pendekatan *Reliability Block Diagram*	*An Efficient Library for Reliability Block Diagram Evaluation*	*Utilizing Weibull Distribution for Fitting System Data and Time Between Maintenance Operations*	*Reliability Evaluation of Electrochemical Energy Storage Systems Supplying the Ship's Main Propulsion System*	*A Multiphase Process Approach to the Analysis of the Reliability and Safety in Maritime Transport Systems*	*Weibull's Analysis of the Dependability of Critical Components of Selected Agricultural Machinery*	Analisis *Human Reliability Assessment* Dengan Metode HEART (Studi Kasus PT ABC)	Judul basic menggunakan *Reliability block Diagram*
Obyek	*Thermal Power Plant*	Mesin Diesel 20 KVA	Komponen Mesin	*Cold Mill*	Mesin *Exctrusion*	Perangkat lunak evaluasi RBD	Peralatan industri tekstil	Sistem penyimpanan energi pada kapal	Sistem transportasi laut	Komponen traktor pertanian	Operator	Objec penelitian yaitu *Hydro Power Plant* PLN Indonesia Power Mrica
Metode	RAM, RBD	RCM (*Reliability Centered maintanance*)	Reliability, availability, mean time to failure, mean time to repair	Reliability Block Diagram	Availability; Reliability; Reliability Analysis; Reliability Block Diagram; Reliasoft Blocksim	Reliability Block Diagram (RBD), Software Library	Weibull Distribution, MTBF Calculation	FMEA, RBD, FTA	*Reliability Modelling, Fault Tree Analysis*	*Weibull Distribution, Dependability Indicators*	*Human Error Probability (HEP), HRA (Human Reliability Assessment)*	*Reliability Block Diagram, MTBF, MTTR, SERP. Weill Bull Analysis*
Tujuan	*Thermal power plant untuk* melakukan evaluasi pada sistem sirkulasi air sehingga	untuk mengetahui bagaimana kondisi maintenance dan mengetahui tingkat	untuk memperbaiki mesin yang gagal bekerja. Baik saat komponen rusak	Melakukan Analisa *reliability block diagram* pada Perusahaan *manufacture* dengan menerpakan	Untuk memodelkan sistem dengan menggunakan metode *Reliability Block Diagram,*	Mengembangkan pustaka efisien untuk evaluasi RBD	Menentukan jadwal pemeliharaan berbasis pola kegagalan pada industri tekstil	Evaluasi keandalan sistem penyimpanan energi dengan pendekatan terintegrasi	Mengembangkan model multiphase untuk analisis keselamatan dan keandalan sistem transportasi laut	Mengoptimalkan pemeliharaan traktor berdasarkan analisis keandalan komponen	Menurunkan risiko *human Error*	1.Mengetahui *reliability* mesin pembangkit untuk memperbaiki efektivitas dan mengoptimalisasikan pemeliharaan dan operational

	dapat ditentukan *strategi maintenance* berdasarkan tingkat kristis masing-masing peralatan	efektivitas serta mengetahui rekomendasi yang tepat untuk meningkatkan efektivitas dari mesin diesel genset tersebut.	maupun saat sedang diperbaiki	kebijakan perawatan secara *preventif*.	mengetahui reliability dari keseluruhan sistem, dan mengetahui *critically equipment*	berbasis waktu						2.Mengetahui identifikasi asset-asset pembangkit dalam untuk menentukan prioritas *Capital Investmen*t agar menjaga kesehatan asset-asset pembangkit tetap handal

2.2 Landasan Teori

Berikut ini landasan teori dari tugas akhir penulis dari penelitian di PT. PLN Indonesia Power UBP Mrica sebagai berikut dibawah ini:

2.2.1 *Maintenance*

Maintenance menurut (Ramesh Gulati, 2012) pemeliharaan atau perawatan juga didefinisikan sebagai suatu kombinasi dari berbagai tindakan yang dilakukan guna menjaga suatu barang dalam memperbaikinya sampai suatu kondisi yang bisa diterima. Beberapa tujuan *maintenance* yang utama yaitu:

1. Memperpanjang usia kegunaan asset (mesin dan peralatan lainnya).
2. Menjamin ketersediaan optimum peralatan yang dipasang untuk produksi.
3. Menjamin kesiapan operasional dari seluruh peralatan yang diperlukan dalam kegiatan darurat setiap waktu.
4. Menjamin keselamatan orang yang menggunakan sarana tersebut.

Berbagai macam jenis-jenis *maintenance* sebagai berikut ini adalah menurut (Ramesh Gulati, 2012) :

1. *Preventif Maintenance*

   preventif maintenance adalah kegiatan perawatan yang dilaksanakan untuk mencegah timbulnya kerusakan peralatan secara tib-tiba dan mempertahankan untuk peralatan pekerjaan seoptimum mungkin sesuai waktu atau umur teknisnya. Kegiatan ini dilakaukan secara rutin dengan berlandaskan kepada *instruction manual* dari perusahaan, standar-standar yang ada (IEC, CIGRE, dll) dan pengalaman operasi di lapangan.

2. *Predictive Maintenance*

   Perawatan yang dilakukan dengan cara memprediksi kondisi suatu peralatan di pabrik, apakah dan kapan kemungkinanannya peralatan tersebut menuju kerusakan, dengan memprediksi kondisi tersebut dapat diketahui gejalanya sejak dini.

3. *Corrective Maintenance*

Perawatan yang dilakukan setelah terjadinya kerusakan atau kelainan pada fasilitas atau peralatan sehingga tidak dapat berfungsi dengan baik. Kegiatan *corrective maintenance* yang dilakukan sering disebut dengan kegiatan perbaikan atau reparasi.

4. *Breakdown Maintenance*

Perawatan yang dilakukan setelah terjadinya kerusakan yang mendadak waktunya tidak tertentu dan sifatnya yang darurat.

2.2.2 Pengertian Keandalan (*Reliability*)

Konsep Reliability pada mulanya dikembangkan oleh A.K. Erlang dan C. Palm yang ditujjukan untuk mengatasi masalah yang terjadi pada telepon. Pada tahun 1930, konsep reliabilitas dinyatakan dalam jumlah rata-rata Tingkat kegagalan untuk pesawat terbang. Pada tahun 1940 tingkat kecelakaan rata-rata Tingkat kegagalan untuk pesawat terbang tidak boleh lebih dari satu kecelakaan dalam setiap 100.000 jam terbang, dalam tahun yang sama analisis reliabilitas dipakai juga dalam peralatan perang. Umumnnya konsep reliabilitas digunakan pada komponen atau system yang berisiko tinggi dan membahasakan. Pada saat ini konsep reliabilitas juga digunakan dalam industrik Listrik, mesin, kimia, system organisasi dan transportasi.

Bermula pada awal tahun 1950-an, kata reliabilitas memperoleh pengertian teknis yang sangat khusus sehubungan dengan kendali mutu dari produk. Telah banyak definisi formal yang diungkapkan dan secara garis besar isinya adalah sebagai berikut:

a) Reliabilitas adalah probabilitas suatu peralatan melakukan tujuannya dengan periode waktu tertentu dengan kondisi tertentu;
b) Reliabilitas dari suatu (sistem, peralatan, dan lain-lain) adalah probabilitas bahwa sistem peralatan tersebut dapat menenunjukkan penampilan yang memuaskan untuk suatu periode waktu yang ditentukan pada kondisi operasi yang ditentukan;
c) Reliabilitas adalah probabilitas tidak terjadinya kegagalan selama periode operasi yang ditentukan.

Igor Balovsky menyatakan konsep modern mengenai reliabilitas, "Dinyatakan secara sederhana, reliabilitas adalah kemampuan suatu peralatan untuk tidak rusak selama operasi. Jika suatu peralatan bekerja baik, dan bekerja bilamana diperlukan untuk melakukan pekerjaan sesuai dengan rancangannya, peralatan tersebut dikatakan dapat diandalkan".

Menurut (O'Connor, 1998) definisi keandalan adalah ukuran kemampuan suatu komponen atau peralatan untuk beroperasi terus menerus tanpa adanya gangguan/kerusakan. Keandalan dapat didefinisikan sebagai probabilitas bahwa suatu komponen atau sistem akan menunjukkan kemampuan yang diharapkan dalam suatu jangka waktu tertentu jika dioperasikan dalam kondisi operasional tertentu.

Teori reliabilitas adalah dasar statistic dan probalitas untuk Teknik reliabilitas. Teknik reliabilitas adalah suatu cabang praktek Teknik yang terus meningkat seperti kimpleksitas dan ketepatan.

Ada empat hal yang perlu diperhatikan sehubungan dengan pengertian reliabilitas yaitu:

1. Probabilitas

   Setiap *item* atau *part* (komponen) dalam suatu sistem memiliki umur atau waktu hidup yang berbeda-beda sehingga terdapat sekelompok item yang memiliki rata- rata hidup tertentu. Jadi untuk mengidentifikasikan distribusi frekuensi dari suatu item dapat dicari dengan melakukan estimasi waktu hidup dari item tersebut.

2. Keandalan (*Reliability*) yang diharapkan

   Hal ini menunjukkan bahwa keandalan merupakan suatu karakteristik kinerja sistem dimana suatu sistem yang handal harus dapat menunjukkan performansi yang memuaskan jika dioperasikan.

3. Waktu

   Keandalan suatu sistem pada umumnya dinyatakan dalam suatu periode waktu karena waktu merupakan parameter yang penting untuk melakukan penilaian kemungkinan suksesnya suatu sistem. Biasanya

faktor waktu tersebut dikaitkan dengan kondisi tertentu, seperti waktu antar kerusakan (*Mean Time To Failure*) dan sebagainya.

4. Kondisi operasional yang spesifik

   Hal ini menjelaskan bagaimana perlakuan yang diterima sistem dalam menjalankan fungsinya dalam arti bahwa dua buah sistem dengan tingkat mutu sama dapat memberikan tingkat keandalan yang berbeda dalam kondisi operasionalnya. Misalnya kondisi temperatur, keadaan atmosfer dan tingkat kebisingan di mana sistem dioperasikan.

Di dalam dunia hari ini yang berteknologi tinggi, hampir setiap orang tergantung pada mesin-mesin dan peralatan yang kompleks untuk kesehatan, keselamatan. kelincahan dan kesejahteraan ekonomi. Kita mengharapkan mobil, komputer, peralatan elektrik, lampu, televisi, dan lainnya, untuk berfungsi kapan pun kita memerlukan mereka dari hari ke hari, tahun demi tahun. Ketika mereka gagal, hasilnya dapat mendatangkan malapetaka, hilangnya hidup ataupun penuntutan perkara berat yang dapat terjadi. Kegagalan yang berulang menimbulkan gangguan, tidak menyenangkan dan suatu ketidakpuasan pelanggan yang mempunyai andil besar dalam menentukan kesuksesan suatu perusahaan di dalam perdagangan.

Dibutuhkan waktu yang lama untuk perusahaan membangun suatu reputasi reliabilitas, dan hanya membutuhkan waktu yang singkat untuk membuat perusahaan tersebut menjadi "yang tak dapat dipercaya" setelah terjadi suatu hasil yang bercacat. Penilaian berkesinambungan atas keandalan produksi dan kendali berkelanjutan dari keandalan semuanya bersifat penting di dalam kompetisi bisnis saat ini.

2.2.3 Perbedaan *Reliability* dan Kualitas

Pemakaian istilah "kualitas dari suatu produk" mempunyai arti sebagai tingkat keungulan dari suatu barang. Di dalam dunia industri, istilah kualitas lebih digunakan secara benar yaitu "persyaratan-persyaratan di awal penggunaan". Mengumpamakan spesifikasi hasil, cukup menangkap persyaratan-persyaratan pelanggan, tingkatan- kualitas sekarang dapat dengan tepat diukur oleh spesifikasi yang memenuhi persyaratan.

Tetapi berapa banyak barang yang masih memenuhi persyaratan setelah beroperasi selama 1 minggu, 1 bulan, ataupun pada akhir masa garansi 1 tahun. Disinilah *reliabilitas* berperan. Kualitas merupakan gambaran awal dari hidup suatu barang sedangkan reliabilitas adalah gambar hidup dari operasi suatu barang tiap harinya. Kerusakan awal merupakan kesalahan memproduksi yang lepas dari pengujian akhir. Kerusakan tambahan yang muncul pada waktu penggunaan adalah "kerusakan reliabilitas" atau "*fallout reliabilitas*".

Tingkat kualitas boleh digambarkan oleh suatu nisbah cacat. Untuk mendeskripsikan kerusakan reliabilitas sebuah probabilitas model yang menggambarkan fraksi kerusakan dari waktu ke waktu sangat diperlukan. Ini dikenal sebagai "Model Distribusi Kehidupan" atau "*life-time distribution*".

2.2.4 Fungsi Distribusi kerusakan (*Failure Distribution*)

Failure Distribution merupakan ekspresi matematis usia dan pola kerusakan mesin atau peralatan. Karakteristik kerusakan setiap peralatan/mesin akan mempengaruhi bentuk kedekatan yang digunakan dalam menguji kesesuaian dan menghitung parameter fungsi distribusi kerusakan.

Karakteristik kerusakan dari setiap peralatan/mesin pada umumnya tidak sama terutama jika dioperasikan dalam kondisi lingkungan yang berbeda. Suatu peralatan/mesin yang memiliki karakteristik dan dioperasikan dalam kondisi yang sama juga mungkin akan memberikan nilai selang waktu antar kerusakan yang berlainan.

Pada umumnya, saat terjadi perubahan kondisi peralatan dari baik menjadi rusak tidak dapat diketahui dengan pasti, namun dapat diketahui probabilitas terjadinya perubahan tersebut.

2.2.5 Fungsi Kepadatan Peluang

Bila X menyatakan variabel acak kontinu sebagai waktu kerusakan dari suatu sistem dari jumlah kerusakan pada suatu waktu, dan mempunyai fungsi distribusi $f(x)$ yang kontinu di setiap titik sumbu nyata maka $f(x)$ dikatakan sebagai fungsi

kepadatan peluang dari variabel X. Jika x data bernilai nyata (X ≥ 0) pada interval waktu t, harus memenuhi persyaratan sebagai berikut:

$$f_x(t) \geq 0; untuk\ t \geq 0\ dan\ \int_0^\infty f_x(t)dt = 1 \qquad (1)$$

2.2.6 Fungsi Kepadatan Kumulatif

Fungsi distribusi kumulatif merupakan fungsi yang menggambarkan probabilitas terjadinya kerusakan sebelum waktu *t*. Probabilitas suatu sistem atau peralatan mengalami kegagalan dalam beroperasi sebelum waktu t, yang merupakan fungsi dari waktu yang secara matematis dapat dinyatakan sebagai:

$$F(t) = P(X < t)$$

Dimana :

$$F(0) = 0$$

$$\lim_{t\to\infty} F(t) = 1$$

Hubungan antara fungsi distribusi kumulatif *F* dan fungsi kepadatan peluang *f* diberikan oleh :

$$F(t) = \int_0^t f(s)\, ds\ untuk\ t \geq 0. \qquad (2)$$

Nilai fungsi distribusi kumulatif ini memenuhi $0 \leq f(t) \leq 1$.

2.2.7 Fungsi Reliabilitas

Menurut (O'Connor, 1998), keandalan atau reliabilitas didefinisikan sebagai kemungkinan sistem atau komponen akan berfungsi hingga waktu tertentu (t). Saat menentukan keandalan dari suatu peralatan, terdapat hal penting yang harus diperhatikan yaitu spesifikasi fungsi yang diharapkan dari peralatan tersebut. Keandalan harus diterjemahkan dalam satuan fungsi waktu.

Definisi fungsi keandalan adalah probabilitas suatu peralatan dapat beroperasi dengan baik tanpa mengalami kerusakan dalam periode waktu tertentu.

Probabilitas atau kemungkinan kerusakan dari suatu fungsi waktu dapat dinyatakan sebagai :

$$F(t) = P(T \leq t)$$

Dimana:

T= variable acak kontinu yang menyatakan waktu hidup peralatan.

Fungsi reliabilitas, dinotasikan dengan R(t), didefinisikan sebagai berikut :

$R(t) = P(T \geq t)$

Bila dilihat dari waktu kerusakan atau kegagalan *variable* T yang memiliki fungsi kepekatan f(t), maka dapat didefinisikan sebagai berikut:

$$R(t) = 1 - F(t) \qquad (3)$$

$$= 1 - \int_0^t f(s)ds$$

$$= \int_t^\infty f(s)ds$$

Luas area keseluruhan kurva sama dengan 1 sehingga dapat dikatakan nilai probabilitas fungsi keandalan dan fungsi distribusi kumulatif berada diantara 0 hingga 1, yakni:

$$0 \leq R(t) \leq 1$$

$$0 \leq F(t) \leq 1$$

2.2.8 *System & Equipment Reliability Prioritization* (SERP)

Failure Defense Planning (FDP) adalah metode rekayasa untuk mencapai keandalan operasional maksimum saat merencanakan pemeliharaan. Pengembangan FDP merupakan pertimbangan penting dalam sistem kerja dan peralatan untuk keseluruhan proses, berdasarkan biaya, keselamatan produksi, masalah lingkungan, kualitas produk dan masalah bisnis lainnya. FDP tingkat pertama dicapai melalui *System Equipment Reliability Prioritization* (SERP), yang memiliki tujuan khusus sebagai berikut:

a) Identifikasi dan klasifikasi sistem: stasiun pertama dibagi menjadi sistem fungsional. Suatu sistem secara luas didefinisikan sebagai sekumpulan perangkat yang bekerja sama untuk menyediakan fungsi tertentu yang mendukung operasi stasiun. Kekritisan sistem disusun berdasarkan sejumlah aspek operasional, dan peringkat ini digabungkan untuk menghasilkan *System Criticality Rangking* (SCR).

b) *Identification dan Ranking of Assets (Operational Criticality)*: Perangkat diidentifikasi dan terhubung ke sistem induk. Setiap peralatan yang diidentifikasi diberi *Equipment Criticality Ranking* (ECR) berdasarkan

seberapa penting peralatan tersebut terhadap pengoperasian sistem root gabungan. ECR ini digabungkan dengan SCR sehingga membentuk *Asset Criticality Rating* (ACR).

c) *Ranking of Equipment* (Kemungkinan Kegagalan): Perangkat dinilai berdasarkan kemungkinan kegagalan atau pengoperasian yang tidak dapat diandalkan. *Asset Failure Probability Facto* (AFPF) ini digabungkan dengan ACR untuk membentuk *Maintenance Priority Index* (MPI). Peringkat MPI dimaksudkan untuk menggambarkan kepentingan relatif dan tingkat permintaan yang diberikan oleh organisasi pemeliharaan terhadap peralatan agar dapat berfungsi dengan baik.

SERP adalah metode pemeringkatan keandalan peralatan dengan mempertimbangkan dampak dan kemungkinan kegagalan, untuk menentukan prioritas analisis kebutuhan pemeliharaan. Banyak perusahaan pembangkit listrik menggunakan SERP karena jumlah sistem peralatannya banyak, dampak kegagalan operasional dan kegagalan berikutnya berbeda, keandalan setiap sistem peralatan berbeda, dan sumber daya terbatas.

Hasil SERP adalah *Maintenance Priority Index* (MPI), dimana MPI adalah rangking perangkat dengan nilai 1 sampai 1000 yang digunakan untuk memprioritaskan pemeliharaan, termasuk *System Criticality Ranking* (SCR), *Equipment Criticality Rating* (ECR) dan *Asset Failure Probability Factor* (AFPF).

MPI = *Consequence X Consequence X Probability*

MPI = ((SCR x ECR)=ACR) x AFPF (4)

Berikut tahapan-tahapan Langkah untuk menentukan SERP:

1. Menentukan system dasar dalam suatu unit, Dimana system adalah kumpulan peralatan/ E*quipment.*
2. *System Criticality Rating* (SCR)

   SCR adalah komponen kunci dalam SERP untuk mengklasifikasikan aset berdasarkan risiko, Menurut (Bradley, 2022) ”Tingkat kepentingan suatu aset dalam mencapai tujuan organisasi, berdasarkan dampak kegagalan atau kehilangan fungsinya terhadap kinerja, risiko, dan biaya." penjelasan Setiap

sistem atau perangkat diukur berdasarkan tujuh dimensi (fungsi dan nilai), ditunjukkan pada Tabel 1 s/d 5; selain unit atau entitas, hasilnya digabungkan untuk menghitung SCR.

$$SCR = \sqrt{(CF^2 + EF^2 + CA^2 + SF^2 + EFF^2)/5} \qquad (5)$$

Di antaranya:

Cost Factor (CF): Biaya pemeliharaan rata-rata

Cormmecial Availability (CA): ketersediaan produksi

Safety (SF): dampak risiko keselamatan di tempat kerja dan jumlah pekerja yang terkena dampaknya.

Environmental Factor (EF): Kepatuhan terhadap Kebijakan Lingkungan

Efficiency Factor (EFF): Efisiensi Pabrik

Tabel 2. 2 : Kriteria *Safety*

System Criticality Ranking (SCR) Criteria	Skor	Equipment Criticality Ranking (ECR) Criteria	Skor
S : Safety		**S : Safety**	
High Safety Concern, possible **fatality,** injuries occur to personnel	10	High Safety Concern, possible **fatality,** injuries occur to personnel	10
High Safety Concern - injuries occur to personnel, **lost time**.	8	High Safety Concern - injuries occur to personnel, **lost time**.	8
Safety concerns - Possible **doctor** attended injuries.	5	Safety concerns - Possible **doctor** attended injuries.	5
Low Safety Concern - Action taken to secure area.	3	Low Safety Concern - Action taken to secure area.	3
No Safety Concern	1	No Safety Concern	1

Tabel 2. 3 : Kriteria *Environmental*

System Criticality Ranking (SCR) Criteria	Skor	Equipment Criticality Ranking (ECR) Criteria	Skor
E : Environmental		**E : Environmental**	
Shut Down	10	Shut Down	10
Fine	8	Fine	8
Notice of Violation	5	Notice of Violation	5
Close Call (Non-Reportable)	3	Close Call (Non-Reportable)	3
No Effect	1	No Effect	1

Tabel 2. 4 : Kriteria *Cost*

System Criticality Ranking (SCR) Criteria	Skor	Equipment Criticality Ranking (ECR) Criteria	Skor
C : Cost		**C : Cost**	
>10 M	10	>100 M	10
5 M - 10 M	9	50 M - 100 M	9
2.5 M - 5 M	8	25 M - 50 M	8
1 M - 2.5 M	7	10 M - 25 M	7
750 Juta - 1 M	6	7.5 M - 10 M	6
500 Juta - 750 Juta	5	5 M - 7.5 M	5
250 Juta - 500 Juta	4	2.5 M - 5 M	4
50 juta - 250 Juta	3	500 Juta - 2.5 M	3
10 Juta - 50 Juta	2	100 Juta - 500 Juta	2
<10 Juta	1	<100 Juta	1

Tabel 2. 5 : Kriteria *Commercial Availability*

System Criticality Ranking (SCR) Criteria	Skor	Equipment Criticality Ranking (ECR) Criteria	Skor
CA : Commercial Availability		**CA : Commercial Availability**	
Plant Shutdown	10	Plant Shutdown	10
Long Term Unit Shutdown (> 1 week)	9	Long Term Unit Shutdown (> 1 week)	9
Short Term Unit Shutdown (< 1 week)	8	Short Term Unit Shutdown (< 1 week)	8
Long Term Boiler Shutdown (> 1week)	7	Long Term Boiler Shutdown (> 1week)	7
Short Term Boiler Shutdown (< 1week)	6	Short Term Boiler Shutdown (< 1week)	6
Long Term Load Reduction (> 1 week)	5	Long Term Load Reduction (> 1 week)	5
Short Term Load Reduction (< 1 week)	4	Short Term Load Reduction (< 1 week)	4
Future Potential Loss of MW's	3	Future Potential Loss of MW's	3
No Effect	1	No Effect	1

Tabel 2. 6 : Kriteria *Efficiency*

System Criticality Ranking (SCR) Criteria	Skor	Equipment Criticality Ranking (ECR) Criteria	Skor
E : Efficiency		**E : Efficiency**	
berdampak besar	10	berdampak besar	10
berdampak kecil	5	berdampak kecil	5
tidak berdampak	1	tidak berdampak	1

3. *Equipment Criticality Ranking* (ECR) Perangkat di setiap sistem diklasifikasikan menurut tingkat kepentingannya terhadap pengoperasian sistem induk. Untuk mengevaluasi setiap perangkat, gunakan dua parameter berikut:
   a) Tergantung pada waktu kegagalan peralatan mempengaruhi kegagalan fungsional system.
   b) Ketersediaan untuk redundansi atau redundansi peralatan
4. *Asset Criticality Classification (ACR)* Klasifikasi kekritisan aset ditentukan dari nilai *SCR dengan Equipment Criticality Rank (ECR).* Suatu peringkat tertentu pada equipment yang menunjukkan Tingkat kekritisannya terhadap fungsi individu dan operasionalnya yang merupakan kombinasi ECR dengan SCR.

   ACR= SCR x ECR (6)

5. *Asset Failure Probability Factor (AFPF)*

   Keandalan peralatan harus dipertimbangkan secara hati-hati, berdasarkan catatan peralatan, keahlian karyawan, serta diskusi pengoperasian, pemeliharaan, dan teknik. Reliabilitas kemudian ditentukan pada skala dengan memperhitungkan rentang sangat dapat dipercaya hingga sangat tidak dapat diandalkan.

2.2.9 *Mean Time Between Failure* (MTBF)

Mean Time Between Failure adalah istilah yang digunakan dalam penghitungan keandalan yang mengacu pada waktu suatu perangkat atau aset atau peralatan yang diukur dari saat perangkat tersebut digunakan hingga saat perangkat tersebut rusak. Semakin tinggi MTBF, perangkat tersebut cenderung semakin andal. MTBF adalah kebalikan dari tingkat kegagalan, yang mewakili waktu rata-rata yang diperlukan agar kegagalan terjadi. Perlu dicatat bahwa MTBF ini tidak menunjukkan durasi kegagalan total. MTBF ini merupakan nilai rata-rata waktu pengoperasian antar kegagalan. Dengan kata lain, waktu antar kegagalan bisa lebih kecil atau lebih besar dari nilai MTBF ini. Untuk menghitung MTBF dapat digunakan rumus sebagai berikut (O'Connor, 1987):

$$MTBF = \frac{Total\ Waktu\ Operasi\ (uptime)}{Jumlah\ Kegagalan} \quad (7)$$

2.2.10 *Mean Time To Repair* (MTTR)

MTTR mengukur rata-rata waktu yang dibutuhkan untuk memperbaiki suatu peralatan setelah terjadi kegagalan. Metrik ini mencerminkan efisiensi pemeliharaan. dapat digunakan rumus sebagai berikut (O'Connor, 1987):

$$MTTR = \frac{Total\ Waktu\ Perbaikan}{Jumlah\ Kegagalan} \quad (8)$$

2.2.11 *Mean Time to failure* (MTTF)

MTTF mengukur rata-rata waktu operasi sebelum suatu komponen atau peralatan mengalami kegagalan pertama kali. Biasanya digunakan untuk komponen yang tidak diperbaiki dapat digunakan rumus sebagai berikut (O'Connor, 1987):

$$MTTF = \frac{Total\ Waktu\ Opersi\ sebelumm\ Kegagalan}{Jumlah\ Unit\ yang\ gagal} \quad (9)$$

2.2.12 Laju Kegagalan (*Failure Rate*)

Laju kegagalan adalah jumlah kegagalan dalam suatu selang waktu. Laju kegagalan (λ) adalah nilai laju kegagalan yang dapat dinyatakan sebagai perbandingan waktu kegagalan yang terjadi dengan waktu total saat operasi dari suatu peralatan (O'Connor, 1987). Nilai laju kegagalan untuk sebuah sistem yang

memiliki laju kegagalan konstan dapat dihitung dengan menggunakan persamaan di bawah ini (O'Connor, 1987):

$$\lambda = \frac{f}{T} = \frac{1}{MTBF} = \frac{f(t)}{R(t)} \qquad (10)$$

Dimana:

f = banyaknya kegagalaran selama jangka waktu operasi

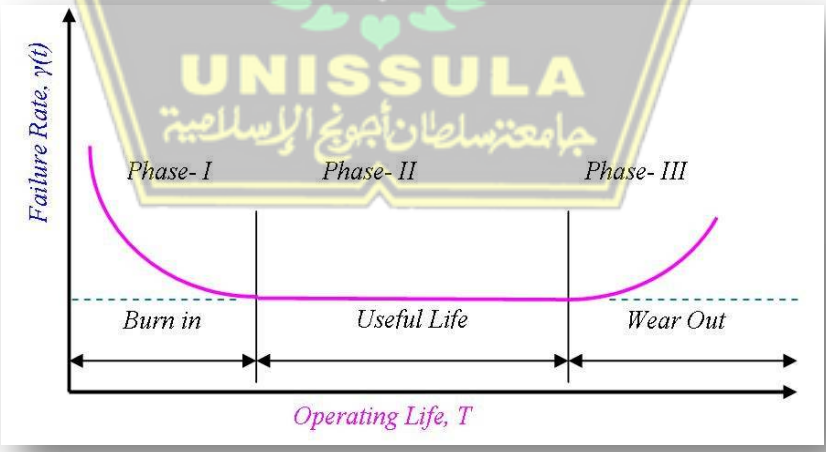
T = total waktu operasi

MTBF = *Mean Time Between Failure*

2.2.13 Karakteristik Kegagalan

Kurva tingkat kegagalan menunjukkan karakteristik laju kegagalan peralatan sebagai fungsi waktu. Pada kurva laju kegagalan (Gambar 2.1), terdapat tiga tahap kegagalan: kegagalan awal, kegagalan normal (masa manfaat), dan kegagalan akhir (keausan).

Tahap kegagalan awal ditandai dengan laju kegagalan yang tinggi akibat kesalahan dalam proses produksi atau pengendalian kualitas. Interval normal menunjukkan tingkat kegagalan yang rendah dan konsisten selama periode waktu tertentu. Tahap lanjutan merupakan tahap dimana laju kegagalan produk kembali tinggi akibat keausan peralatan akibat penggunaan.



Gambar 2. 1 : Kurva Laju Kegagalan
(O'Connor & KLEYNER, 2011)

A. *Burn In / Infant mortality*

Daerah ini adalah periode dimana sebuah sistem berada pada fase perancangan (*design*) hingga permulaan beroperasinya suatu peralatan atau sistem yang masih baru. Pada kurva ditunjukan bahwa laju kerusakan yang awalnya tinggi kemudian menurun dengan bertambahnya waktu, atau diistilahkan sebagai *decreasing failure rate* (DFR). Kerusakan yang terjadi umumnya disebabkan karena proses manufacturing atau fabrikasi yang kurang sempurna.

B. *Useful Life Time Zone*

Periode ini mempunyai laju kerusakan yang paling rendah dan hampir konstan, yang oleh sebab itu disebut *Constant Failure Rate* (CFR). Kerusakan yang terjadi bersifat random dan dipengaruhi oleh kondisi lingkungan. Ini adalah periode dimana sebagian besar umur berada pada masa pakai peralatan atau sistem itu. Dalam analisa, tingkat keandalan sistem yang berada pada periode *useful life time*, akan diasumsikan memiliki *failure rate konstan* terhadap waktu. Asumsi ini digunakan karena pada periode *early life time*, tidak dapat ditentukan apakah sistem tersebut sudah bekerja sesuai dengan standar yang ditentukan atau belum sedangkan pada periode *wear out time*, tidak dapat diprediksi kapan akan terjadi *failure*.

C. *Wear Out Zone*

Periode ini adalah periode akhir masa pakai peralatan atau sistem. Pada periode ini, laju kerusakannya naik dengan cepat dengan bertambahnya waktu, yang disebut dengan istilah *increasing failure rate* (IFR). Periode ini berakhir saat *reliability* peralatan atau sistem ini mendekati nol, dimana kerusakan yang terjadi sudah sangat parah dan tidak dapat diperbaiki kembali.

2.2.14 Distribusi Kegagalan *Weibull*

Dengan dilakukannya distribusi *Weibull* untuk menentukan perhitungan keandalan dan jenis karakteristik kegagalan, Jika distribusi kerusakan suatu sistem,

sub sistem atau peralatan mengikuti distribusi *Weibull*, maka padat peluangnya adalah:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta}\left[\frac{t-\gamma}{\eta}\right]^{\beta-1} exp\left[-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta}\right] \quad (11)$$

Dimana :

β = Parameter Bentuk (Shape Parameter), $\beta > 0$

η = Parameter Skala (Shape Parameter), $\eta > 0$

γ = Parameter Lokasi

- Fungsi Keandalan Distribusi *Weibull* :

$$R(t) = exp\left[-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)\right] \quad (12)$$

- Laju Kegagalan Distribusi *Weilbull* :

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta}\left[\frac{t-\gamma}{\eta}\right]^{\beta-1} \quad (13)$$

- MTBF Untuk Distribusi *Weilbull* adalah:

$$MTBF = \gamma + \eta\left(\frac{1}{\beta} + 1\right) \quad (14)$$

2.2.15 *Reliability System*

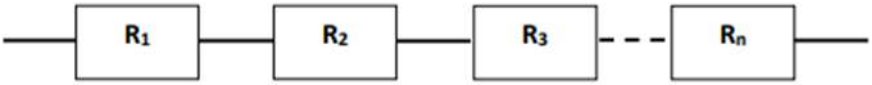
Untuk mengevaluasi keandalan suatu perangkat atau sistem, hal pertama yang harus dilakukan adalah memodelkan perangkat atau sistem tersebut berdasarkan diagram blok keandalan (*Reliability Block Diagram*). Dari diagram keandalan fungsional inilah dihitung keandalan perangkat atau sistem yang bersangkutan. Hal ini sangat mungkin dilakukan pada sistem yang sederhana. Ada beberapa sistem keandalan yang dapat digunakan untuk menganalisis keandalan sistem, khususnya sistem seri dan sistem paralel.

I. Serial System

Suatu sistem dapat dimodelkan dalam susunan serial jika komponen perangkat sistem harus berfungsi penuh atau beroperasi agar sistem berhasil menyelesaikan misinya (Gambar 2.3).

Dengan kata lain, jika satu perangkat saja tidak berfungsi, sistem tidak dapat lagi menjalankan fungsinya. Jika suatu sistem terdiri dari beberapa peralatan

yang disusun secara seri, maka keandalan sistem tersebut merupakan hasil perkalian dari masing-masing komponen penyusunnya.



Gambar 2. 2 : RBD Serial

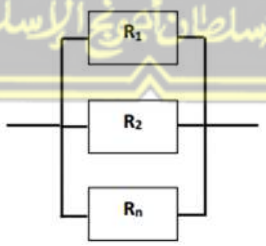
Dari gambar di atas, jika keandalan masing-masing komponen adalah R1, R2, R3... Rn maka keandalan sistemnya adalah:

$$R_S = R_1 X R_2 X R_3 X \dots R_N = \Pi_1^n R_N \quad (15)$$

II. Sistem paralel

Suatu sistem dapat dimodelkan dengan susunan paralel jika salah satu komponen mengalami kegagalan. Sistem masih dapat beroperasi (Gambar 2.3). Jika seluruh komponen sistem tidak berfungsi maka sistem tidak akan dapat menjalankan fungsinya.

Sistem ini sering kali beroperasi sebagai *redundancy*, artinya sistem ini menggunakan banyak komponen untuk meningkatkan keandalan. Sistem dapat berfungsi dengan baik selama seluruh komponen sistem tidak mengalami *malfunction*; dengan kata lain sistem akan berjalan dengan baik selama satu atau lebih komponen penyusunnya bekerja dengan baik.



Gambar 2. 3 : RBD Paralel

Dari gambar diatas, jika keandalan masing-masing komponen adalah R_1, R_2, ... R_n, maka keandalan dari system tersebut adalah:

$$R_p = 1 - (1 - R_1)(1 - R_2) \dots (1 - R_n) = 1 - \Pi_1^n (1 - R_n) \quad (16)$$

2.3 Hiptesis dan Kerangka Teoritis

2.3.1 Hipotesis

Hipotesis adalah suatu jawaban yang sifatnya sementara terhadap permasalahan sampai terbukti melalui data terkumpul (Suharsimi, 2010). Berdasarkan teori diatas, maka diajukan hipotesis sebagai berikut:

A. Hipotesis nol (H0): Penerapan *Reliability Block Diagram* (RBD) tidak berpengaruh signifikan dalam mendukung pengambilan keputusan pemeliharaan (O&M) dan penentuan prioritas *Capital Investment* sebagai bagian dari *Asset Health Management*.

B. Hipotesis Alternatif (H1): Penerapan *Reliability Block Diagram* (RBD) berpengaruh signifikan dalam mendukung pengambilan keputusan pemeliharaan (O&M) dan penentuan prioritas *Capital Investment* sebagai bagian dari *Asset Health Management*.

2.3.2 Kerangka Teoritis

Penelitian ini didasarkan pada pendekatan manajemen keandalan sistem dalam konteks pengelolaan aset pembangkit listrik. Fokus utamanya adalah penerapan *Reliability Block Diagram* (RBD) sebagai alat analisis keandalan untuk mendukung *Asset Health Management*, khususnya dalam pengambilan keputusan strategis terkait Operation & Maintenance (O&M) dan *Capital Investment*.

Adapun konsep-konsep utama yang menjadi landasan teori dalam penelitian ini adalah:

1) Manajemen Pemeliharaan (*Maintenance Management*)

Maintenance merupakan proses sistematis yang dilakukan untuk menjaga atau mengembalikan peralatan ke kondisi operasional yang optimal. Jenis-jenis pemeliharaan meliputi:

- *Preventive Maintenance*: pemeliharaan terjadwal untuk mencegah kerusakan.

- *Predictive Maintenance*: pemeliharaan berdasarkan prediksi kondisi peralatan.
- *Corrective Maintenance*: perbaikan setelah terjadinya kerusakan.
- *Breakdown Maintenance*: tindakan darurat saat peralatan rusak total.

2) Reliabilitas Sistem (*System Reliability*)

Reliabilitas merupakan probabilitas suatu sistem atau komponen dapat beroperasi tanpa mengalami kegagalan dalam periode waktu tertentu dan pada kondisi operasi tertentu. Ukuran yang umum digunakan antara lain:

- MTBF (*Mean Time Between Failure*)
- MTTR (*Mean Time to Repair*)
- *Failure Rate* (λ)
- *Availability* dan *Maintainability*

3) *Reliability Block Diagram* (RBD)

RBD adalah alat visual yang menggambarkan hubungan antara komponen dalam sistem berdasarkan aliran fungsi dan reliabilitasnya. Dalam konteks sistem pembangkit, RBD digunakan untuk:

- Mengidentifikasi konfigurasi komponen (serial, paralel, kombinasi).
- Menghitung reliabilitas sistem secara keseluruhan.
- Menentukan titik-titik kritis (*critical points*) yang memengaruhi performa.

4) *System & Equipment Reliability Prioritization* (SERP)

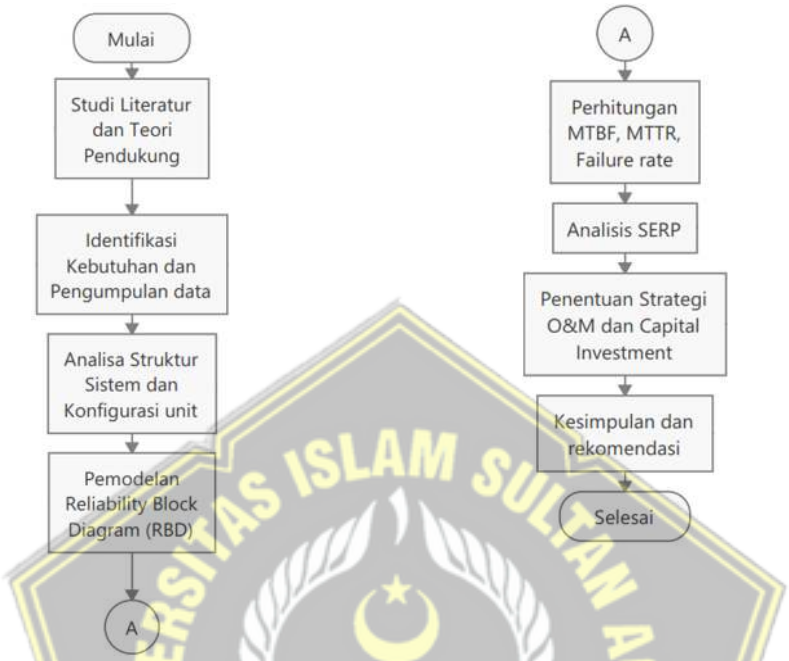
SERP adalah metode klasifikasi dan pemeringkatan sistem dan peralatan berdasarkan kombinasi faktor:

- *System Criticality Rating* (SCR)
- *Equipment Criticality Rating* (ECR)
- *Asset Failure Probability Factor* (AFPF)

5) *Asset Health Management* (AHM)

Merupakan pendekatan strategis untuk mengelola siklus hidup aset secara menyeluruh, dengan fokus pada keandalan, efektivitas biaya, dan perencanaan jangka panjang. Dalam penelitian ini, AHM digunakan untuk

mendukung keputusan O&M dan *Capital Investment* berbasis data reliabilitas.



Gambar 2. 4 : *Flow Chat* Langkah Kerja

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Objek Penelitian

Objek penelitian dalam studi ini adalah sistem pembangkit listrik tenaga air yang dikelola oleh PT. PLN Indonesia Power UBP Mrica. Penelitian ini difokuskan pada analisis keandalan sistem pembangkit yang melibatkan beberapa komponen utama, yaitu:

1) Unit Pembangkit:

   Terdiri dari beberapa mesin pembangkit yang berfungsi untuk mengubah energi potensial air menjadi energi listrik. Setiap unit memiliki karakteristik dan spesifikasi teknis yang berbeda, yang mempengaruhi kinerja dan keandalannya.

2) Peralatan Pendukung:

   Termasuk sistem kontrol, sistem pemeliharaan, dan peralatan lainnya yang mendukung operasi unit pembangkit. Keandalan peralatan ini sangat penting untuk menjaga kinerja keseluruhan sistem.

3) Data Historis:

   Data yang diperoleh dari sistem *Enterprise Resource Planning* (ERP) perusahaan, yang mencakup informasi tentang kegagalan, pemeliharaan, dan performa setiap unit pembangkit. Data ini akan digunakan untuk analisis lebih lanjut dalam penelitian ini.

Pemilihan PT. PLN Indonesia Power UBP Mrica sebagai objek penelitian didasarkan pada beberapa pertimbangan:

a) *Relevancy*:

   Sebagai salah satu perusahaan penyedia listrik terbesar di Indonesia, analisis keandalan sistem pembangkit di perusahaan ini memiliki dampak yang signifikan terhadap pasokan listrik nasional.

b) Ketersediaan Data:

Perusahaan ini memiliki sistem ERP yang memungkinkan akses ke data historis yang diperlukan untuk analisis keandalan.

c) Kepentingan Praktis:

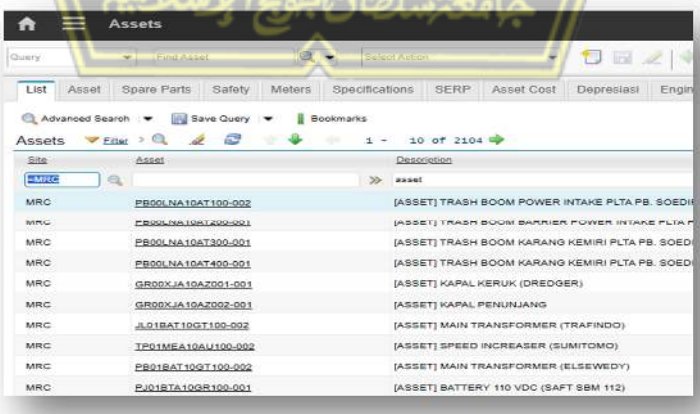
Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan rekomendasi yang berguna bagi perusahaan dalam meningkatkan keandalan sistem dan efisiensi operasional.

3.2 Teknik Pengumpulan Data

Pengumpulan data terdiri dari data primer dan sekunder. Data primer mencakup data operasi, data pemeliharaan, dan data spesifikasi peralatan yang diambil dari *Enterprise Resource Planning* (ERP) Maximo. Sementara itu, data sekunder diperoleh dari *Manual Book* peralatan dan *Maintenance Book Reference*. Data sekunder tersebut dimasukkan ke dalam ERP Maximo untuk kemudian dilakukan pengolahan data *System & Equipment Reliability Prioritization* (SERP) dalam rangka menilai Asset Criticality.

3.2.1 Data Primer

Enterprise Resource Planning (ERP) Maximo menjadi big data dalam pengelolaan asset pembankitan di PT PLN Indonesia Power (Gambar 3.1). Asset terdaftar untuk 34 mesin pembangkit di PT. PLN Indonesia Power UBP Mrica sebanyak 2104 Asset. Dari data Asset (Tabel 3.1) didapat 3 besar asset terbanyak di PLTA Ketenger sebanyak 270 asset, kemudian terbanyak kedua PLTA PB. Soedirman sebanyak 252 dan terbesar ketiga yaitu PLTA Timo sebanyak 206 asset.



Gambar 3. 1 : Data Asset di Maximo

Tabel 3. 1 : Jumlah Asset Per Unit Pembangkit

Nama Pembangkit	Jumlah Asset
PLTA Garung	131
PLTA Jelok	205
PLTA Kedung ombo	78
PLTA Ketenger	270
PLTA Lambur	91
PLTA PB. Soedirman	252
PLTA Timo	206
PLTA Tulis	141
PLTA Wadaslintang	125
PLTA Wonogiri	196
PLTM Klambu	42
PLTM Pejengkolan	76
PLTM Plumbungan	64
PLTM Sempor	64
PLTM Sidorejo	43
PLTM Siteki	61
PLTM Tapen	59
Total Asset	2104

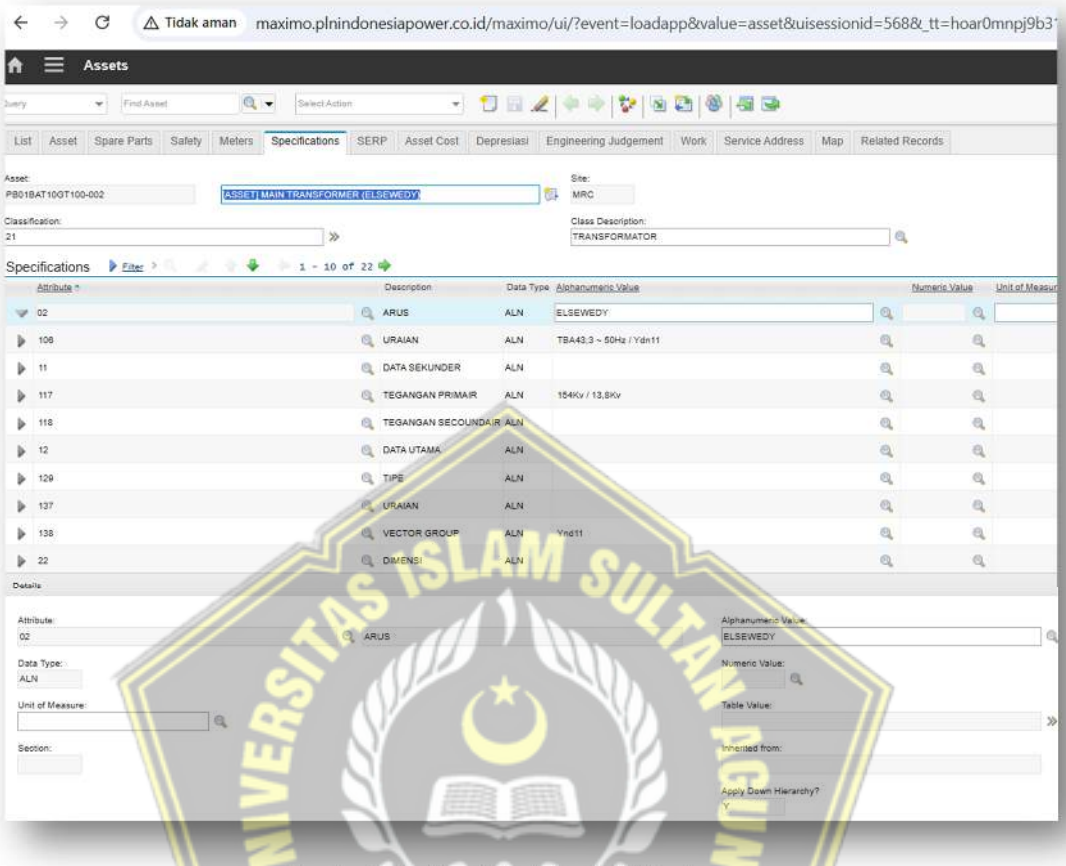
Data operasi yang diperlukan untuk pengolahan meliputi durasi jam operasi masing-masing aset sejak awal pemasangan tau pengoperasiannya (Tabel 3.2). Berdasarkan data, aset dengan jam operasional tertinggi berada di PLTA Timo, Jelok, dan Ketenger. Hal ini disebabkan oleh pengoperasian secara *base load* serta usia beberapa unit yang telah melebihi 70 tahun.

Data pemeliharaan diambil dari ERP Maximo, khususnya data pemeliharaan *corrective* maupun *emergency* yang menyebabkan unit mengalami *down* atau *failure*. Data ini digunakan untuk menghitung nilai *Mean Time Between Failures* (MTBF), *Mean Time to Failure* (MTTF), dan *Mean Time to Repair* (MTTR) dari setiap aset.

Spesifikasi peralatan diperoleh dari manual book masing-masing aset yang telah dimasukkan ke dalam ERP Maximo (Gambar 3.2). Informasi ini digunakan untuk menentukan metode pemeliharaan yang tepat bagi setiap aset.

Tabel 3. 2 : Jam Operasi unit Pembangkit

No	Mesin Pembangkit	DTP (MW)	DMN (MW)	Jam Operasi		Tanggal OH Terakhir
				Sejak Operasi	Saat Ini Sejak Inspection Terakhir	
1	PLTA PB SOEDIRMAN 1	60,3	59,8	110.162,96	277,05	2024-07-06 02:44
2	PLTA PB SOEDIRMAN 2	60,3	59,8	115.142,41	128,80	20/07/2024 00:00
3	PLTA PB SOEDIRMAN 3	60,3	59,8	110.487,84	102,92	05/08/2024 19:28
4	PLTA Tapen 1	0,75	0,73	168.681,60	10.622,89	24/10/2022 08:00
5	PLTA SITEKI	1,2	1,18	100.657,95	10.316,83	03/10/2022 08:00
6	PLTA PLUMBUNGAN	1,6	1,58	102.704,29	7.483,82	27/10/2023 19:12
7	PLTA Jelok 1	5,12	5,1	204.358,16	289,02	28/07/2023 15:28
8	PLTA Jelok 2	5,12	5,1	204.014,30	156,08	25/08/2023 15:19
9	PLTA Jelok 3	5,12	5,1	200.810,64	-	14/10/2023 17:12
10	PLTA Jelok 4	5,12	5,1	190.233,03	133,03	17/10/2023 19:35
11	PLTA Timo 1	4	3,98	371.103,93	8.665,59	29/07/2023 15:35
12	PLTA Timo 2	4	3,98	407.980,61	7.749,67	11/08/2023 17:25
13	PLTA Timo 3	4	3,98	388.012,29	398,52	18/09/2023 00:50
14	PLTA Kedungombo 1	22,5	22,33	107.112,71	4.556,14	29/08/2023 15:26
15	PLTA Sidorejo 1	1,4	1,38	88.782,58	720,95	04/07/2024 23:17
16	PLTA Klambu 1	1,17	1,15	26.907,29	72,73	18/07/2024 22:11
17	PLTA Wadas Lintang 1	9	8,98	227.531,41	862,72	09/08/2024 16:12
18	PLTA Wadas Lintang 2	9	8,98	221.202,82	-	30/09/2023 18:06
19	PLTA Sempor 1	1	0,98	226.576,76	7.154,73	19/09/2022 08:00
20	PLTA Pejengkolan 1	1,4	1,38	203.577,85	5.524,26	15/09/2023 20:00
21	PLTA Wonogiri 1	6,2	6,18	187.557,14	16.859,36	18/11/2023 18:25
22	PLTA Wonogiri 2	6,2	6,18	199.954,44	5.471,86	24/10/2022 08:00
23	PLTA Garung 1	13,2	13,18	61.070,03	2.691,15	17/10/2022 08:00
24	PLTA Garung 2	13,2	13,18	64.925,14	3.280,69	22/08/2022 08:00
25	PLTA Ketenger 1	3,52	3,5	231.703,09	2.765,00	2024-06-07 19:00
26	PLTA Ketenger 2	3,52	3,5	231.511,47	2.586,22	2024-06-14 22:24
27	PLTA Ketenger 3	1	0,98	161.321,62	11.298,13	12/06/2023 08:01
28	PLTA Ketenger 4	0,5	0,48	92.012,36	2.197,98	2024-06-30 23:13
29	PLTA Tulis 1	6,2	2,66	32.075,36	14.696,67	15/10/2023 18:00
30	PLTA Tulis 2	6,2	3,07	42.825,19	15.264,71	21/10/2023 19:00
31	PLTM GUNUNG WUGUL #1	1,66	1,59	6.535,57	-	-
32	PLTM GUNUNG WUGUL #2	1,66	1,51	6.452,41	-	-
33	PLTM LAMBUR #1	4,16	3,9	256,71	-	
34	PLTM LAMBUR #2	4,16	3,9	559,71	-	



Gambar 3. 2 : Spesifikasi Asset di Maximo

3.2.2 Data Sekunder

Pengumpulan data sekunder diambil dari *manual book* dan *maintenance book*. Data tersebut digunakan untuk pengolahan data *System Equipment Reliability Prioritization* (SERP) tujuan adalah mengidentifikasi dan mengklasifikasi system atau disebut *System Criticality Rangking* (SCR), juga Setiap peralatan yang diidentifikasi diberi *Equipment Criticality Ranking* (ECR).

SERP adalah metode pemeringkatan keandalan peralatan dengan mempertimbangkan dampak dan kemungkinan kegagalan, untuk menentukan prioritas analisis kebutuhan pemeliharaan. Terdapat 5 kriteria untuk penilaian yaitu *Safety, Environmental, Cost, Commercial Availability, Efficiency.*

3.3 Pengujian Hipotesa

Pengujian hipotesis merupakan langkah penting dalam penelitian ini untuk menentukan apakah data yang diperoleh mendukung hipotesis yang telah dirumuskan. Dalam penelitian ini, terdapat dua hipotesis yang akan diuji:

- Hipotesis nol (H0): Penerapan *Reliability Block Diagram* (RBD) tidak berpengaruh signifikan dalam mendukung pengambilan keputusan pemeliharaan (O&M) dan penentuan prioritas *Capital Investment* sebagai bagian dari *Asset Health Management.*
- Hipotesis Alternatif (H1): Penerapan *Reliability Block Diagram* (RBD) berpengaruh signifikan dalam mendukung pengambilan keputusan pemeliharaan (O&M) dan penentuan prioritas *Capital Investment* sebagai bagian dari *Asset Health Management*.

3.4 Metode Analisis

Metode analisis dalam penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi keandalan sistem pembangkit listrik tenaga air di PT. PLN Indonesia Power UBP Mrica. Metode yang digunakan meliputi analisis statistik dan model keandalan. Berikut adalah langkah-langkah yang akan diambil dalam analisis:

I. Analisis Deskriptif

Tujuan: Memberikan gambaran umum mengenai data yang dikumpulkan.

Langkah:

- Menghitung nilai rata-rata, median, dan deviasi standar dari variabel yang diteliti.
- Menyajikan data dalam bentuk tabel dan grafik untuk memudahkan pemahaman.

II. Analisis Keandalan

Reliability Block Diagram (RBD):

- Membuat model RBD untuk memvisualisasikan hubungan antara komponen dalam sistem pembangkit.
- Menghitung keandalan sistem berdasarkan model yang telah dibuat.

Analisis *Weibull*:

- Menggunakan distribusi *Weibull* untuk menganalisis karakteristik kegagalan dari komponen sistem.
- Menghitung *parameter Weibull* (shape dan scale) untuk menentukan pola kegagalan.

III. Ranking dan Indeks

Operational Critical Ranking (OCR):

- Menghitung OCR untuk menentukan prioritas operasional dari setiap komponen.

System Criticality Ranking (SCR):

- Menghitung SCR untuk menilai pentingnya setiap sistem dalam keseluruhan operasi pembangkit.

Asset Criticality Ranking (ACR) dan *Maintenance Priority Index* (MPI):

- Menghitung ACR dan MPI untuk mengidentifikasi komponen yang memerlukan perhatian pemeliharaan lebih lanjut.

IV. Analisis Hasil

Interpretasi Data:

- Menganalisis hasil dari pengujian hipotesis dan analisis keandalan.
- Menyajikan hasil dalam bentuk tabel dan grafik untuk memudahkan pemahaman.

Diskusi:

- Membahas implikasi dari hasil analisis terhadap pengelolaan kesehatan aset dan strategi pemeliharaan di PT. PLN Indonesia Power UBP Mrica.

3.5 Pembahasan

Pembahasan ini bertujuan untuk menganalisis dan menginterpretasikan hasil yang diperoleh dari penelitian mengenai keandalan sistem pembangkit listrik tenaga air di PT. PLN Indonesia Power UBP Mrica. Hasil analisis akan dibandingkan dengan teori yang ada dan relevansi terhadap praktik di lapangan.

3.5.1 Keandalan Sistem

Analisis keandalan menggunakan model RBD menunjukkan bahwa beberapa komponen dalam sistem pembangkit memiliki tingkat keandalan yang lebih tinggi dibandingkan yang lain. Komponen dengan nilai ACR (*Asset Criticality Ranking*) tinggi menunjukkan bahwa mereka adalah bagian penting dari sistem yang memerlukan perhatian lebih dalam hal pemeliharaan. Hasil ini sejalan dengan teori yang menyatakan bahwa komponen kritis harus diprioritaskan untuk memastikan kelangsungan operasi.

3.5.2 Analisis *Weibull*

Hasil analisis *Weibull* menunjukkan pola kegagalan yang berbeda untuk setiap komponen. *Parameter shape* dan *scale* yang diperoleh memberikan wawasan tentang umur dan keandalan komponen. Misalnya, komponen dengan nilai shape yang lebih besar menunjukkan bahwa mereka cenderung mengalami kegagalan lebih awal, yang mengindikasikan perlunya strategi pemeliharaan yang lebih *proaktif*.

3.5.3 Prioritas Pemeliharaan

Hasil dari penghitungan *Maintenance Priority Index* (MPI) menunjukkan bahwa beberapa komponen harus menjadi fokus utama dalam strategi pemeliharaan. Dengan memprioritaskan komponen ini, perusahaan dapat mengurangi risiko kegagalan yang dapat mengganggu operasi dan meningkatkan efisiensi.

3.5.4 Implikasi Praktis

Hasil penelitian ini memiliki implikasi praktis yang signifikan bagi PT. PLN Indonesia Power UBP Mrica. Dengan menerapkan RBD dan analisis keandalan, perusahaan dapat:

- Mengoptimalkan strategi pemeliharaan untuk meningkatkan keandalan sistem.
- Mengurangi biaya operasional dengan memfokuskan sumber daya pada komponen yang paling kritis.
- Meningkatkan kinerja keseluruhan sistem pembangkit listrik.

3.6 Penarikan Kesimpulan

Berdasarkan analisis dan pembahasan yang telah dilakukan, berikut adalah kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian mengenai keandalan sistem pembangkit listrik tenaga air di PT. PLN Indonesia Power UBP Mrica:

a. Penerapan Metode RBD

   Penerapan *Reliability Block Diagram* (RBD) terbukti efektif dalam menganalisis keandalan sistem pembangkit. Model RBD yang dibuat memberikan gambaran yang jelas mengenai hubungan antar komponen dan kontribusi masing-masing terhadap keandalan keseluruhan sistem.

b. Prioritas Pemeliharaan

   Analisis *Operational Critical Ranking* (OCR), *System Criticality Ranking* (SCR), dan *Asset Criticality Ranking* (ACR) mengidentifikasi komponen-komponen kritis yang memerlukan perhatian lebih dalam pemeliharaan. Hal ini penting untuk meningkatkan efisiensi operasional dan mengurangi risiko kegagalan.

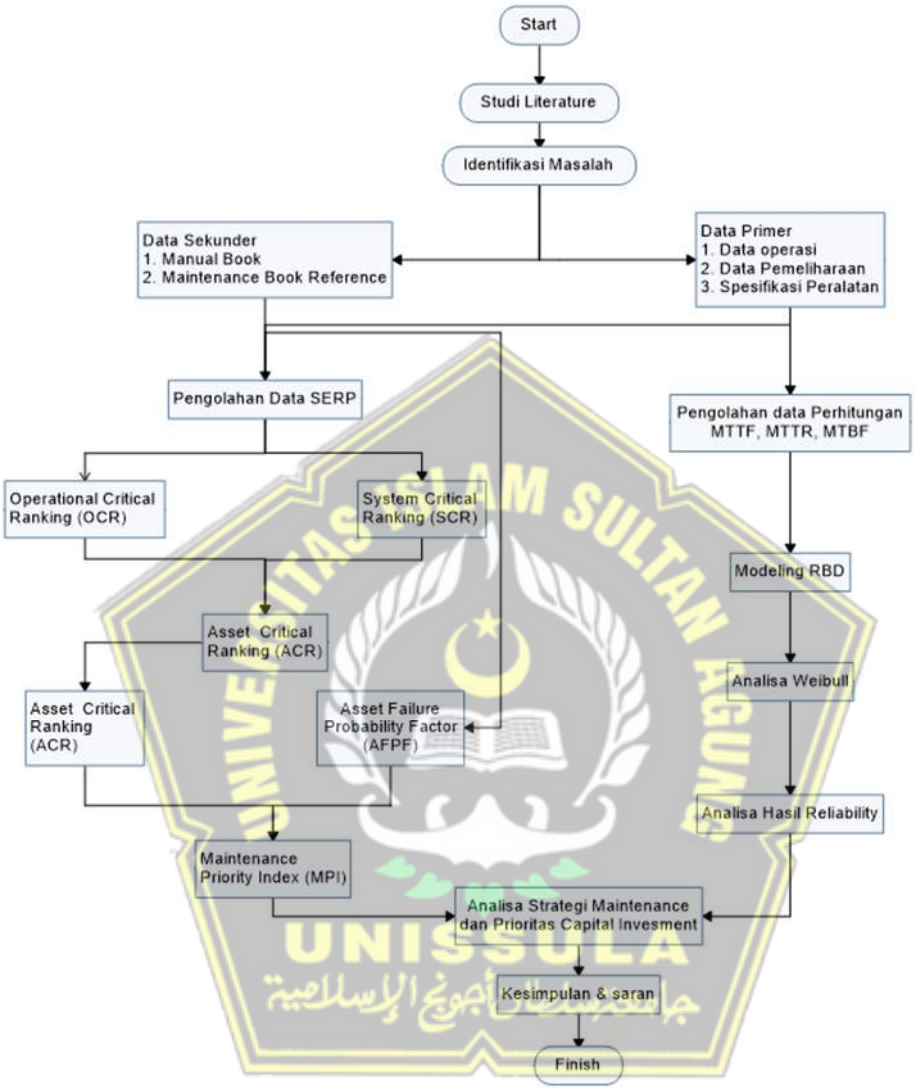
c. Rekomendasi Strategi Pemeliharaan

   Berdasarkan hasil analisis, disarankan agar PT. PLN Indonesia Power UBP Mrica mengimplementasikan strategi pemeliharaan yang berbasis pada data keandalan. Ini termasuk pemeliharaan preventif dan prediktif untuk komponen yang memiliki tingkat kritisitas tinggi.

d. Implikasi Praktis

   Penelitian ini memberikan kontribusi signifikan bagi pengelolaan kesehatan aset di perusahaan, serta dapat menjadi acuan bagi penelitian lebih lanjut dalam bidang keandalan sistem pembangkit listrik.

3.7 Diagram Alir



Gambar 3. 3 : Diagram Alir Metode Analisis

BAB IV
HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

4.1 Pengumpulan Data

Pengumpulan data merupakan langkah penting dalam penelitian ini untuk mendapatkan informasi yang diperlukan dalam analisis keandalan sistem pembangkit listrik tenaga air di PT. PLN Indonesia Power UBP Mrica. Data yang dikumpulkan terdiri dari data primer dan data sekunder.

4.1.1 Data Primer

Data primer merupakan komponen penting dalam proses analisis yang dilakukan. Data primer tersebut mencakup:

a. Data Oprasi

Data ini berisi informasi terkait kinerja harian atau rutin dari peralatan atau sistem yang diamati. Contohnya meliputi jam operasi, beban kerja, parameter kinerja (seperti suhu, tekanan, atau kecepatan), serta catatan operasional lainnya yang dapat memengaruhi keandalan dan pemeliharaan aset.

b. Data Pemeliharaan

Data ini mencakup riwayat perawatan, termasuk jadwal *maintenance*, tindakan perbaikan, penggantian suku cadang, dan downtime yang terjadi. Informasi ini digunakan untuk mengevaluasi efektivitas *strategi* pemeliharaan yang ada serta mengidentifikasi pola kegagalan.

c. Spesifikasi Peralatan

Data ini berisi detail teknis peralatan, seperti kapasitas, batas operasional, material konstruksi, dan rekomendasi dari pabrikan. Spesifikasi ini menjadi dasar untuk menilai apakah peralatan beroperasi dalam kondisi optimal atau rentan terhadap kegagalan.

Data primer tersebut selanjutnya akan diolah untuk menghitung indikator kinerja seperti MTTF (*Mean Time To Failure*), MTTR (*Mean Time To Repair*), dan MTBF (*Mean Time Between Failure*). Selain itu, data ini juga menjadi input untuk analisis *Weibull*, pemodelan RBD (*Reliability Block Diagram*), Dengan demikian, data primer tidak hanya mendukung identifikasi masalah tetapi juga menjadi fondasi dalam menyusun rekomendasi strategi pemeliharaan dan prioritas investasi.

4.1.2 Data Sekunder

Data sekunder berperan sebagai sumber informasi pendukung yang melengkapi analisis. Data sekunder tersebut terdiri dari:

a. *Manual Book*

Dokumen ini berisi panduan operasi, prosedur pemeliharaan, dan instruksi teknis resmi dari pabrikan peralatan. *Manual book* digunakan untuk memahami standar operasional, batasan kinerja, serta langkah-langkah perawatan yang direkomendasikan. Informasi ini membantu memastikan bahwa analisis didasarkan pada pedoman yang valid dan terstandarisasi.

b. *Maintenance Book Reference*

Data ini mencakup catatan historis pemeliharaan, laporan inspeksi, dan rekomendasi perbaikan dari periode sebelumnya. *Maintenance book reference* memberikan wawasan tentang pola kegagalan, *frekuensi intervensi* perawatan, dan efektivitas tindakan yang telah dilakukan di masa lalu.

c. *Literatur Studi*

Studi literatur meliputi referensi akademis, jurnal, standar industri (misalnya ISO, ASTM), atau best practice dari kasus serupa. Literatur ini digunakan untuk membandingkan temuan dengan teori atau pengalaman lapangan yang telah terbukti, sehingga memperkuat rekomendasi analisis.

Data sekunder berfungsi sebagai landasan teoritis dan kontekstual untuk:

- Memvalidasi temuan dari data primer.
- Menyusun parameter perhitungan kritikalitas aset (misalnya dalam *Asset Criticality Ranking*/ACR).
- Mendukung interpretasi hasil analisis reliabilitas dengan membandingkannya terhadap standar industri.

Dengan memadukan data sekunder dan primer, proses identifikasi masalah hingga penyusunan strategi pemeliharaan menjadi lebih komprehensif dan terukur.

4.1.3 Pengolahan data MTBF, MTTR & MTTF

Sebelum melakukan perhitungan, MTBF (*Mean Time Between Failures*), MTTR (*Mean Time To Repair*), dan MTTF (*Mean Time To Failure*) beberapa ata dan dokumen harus disiapkan:

a) Data Operasi (*Uptime & Downtime*)
   - Catatan waktu operasi peralatan (running hours).
   - Log downtime (termasuk penyebab dan durasi).

b) Data Pemeliharaan (*Maintenance Records*)
   - Riwayat perbaikan (tanggal, durasi perbaikan, tindakan yang dilakukan).
   - Daftar komponen yang diganti atau diperbaiki.

c) Spesifikasi Peralatan
   - Batas operasional (misalnya, beban maksimal, suhu kerja).
   - Rekomendasi maintenance dari pabrikan.

d) Kriteria Kegagalan (Failure Definition)

   Definisi jelas tentang apa yang dianggap "kegagalan" (misalnya, mesin mati total, penurunan kinerja 20%, dll.).

Data-data yang dibutuhkan semua tersimpan dalam ERP asset pembangkitan dari data operasional maupun pemeliharaaan. Mengacu pada rumusan MTBF no. (7) dari 2104 Asset pembangkitan nilai MTBF yang terkecil dari semua unit pembangkit (Tabel 4.1).

Tabel 4. 1 : Top MTBF Terkecil Setiap Unit Pembangkit

KODE UNIT	NAMA UNIT	DESCRIPTION	Jam Operasi (A)	JUMLAH GANGGUAN (B)	TOTAL JAM GANGGUAN (C)	TOTAL JAM ANTAR GANGGUAN (D)	MTBF (Jam)	MTTR (Jam)	MTTF (Jam)
GW00	Gunung Wugul Common	[ASSET] JTM 20 KV	29850	150	21171	8814	199	141	58
TP01	Tapen	[ASSET] JTM 20 KV	241832	74	36854	205011	3268	498	2770
SP01	Sempor	[ASSET] Feeder Express 20 KV GB3	386624	112	22904	363795	3452	204	3248
WG00	Wonogiri Common	[ASSET] PENGHANTAR 22 KV	361504	79	6620	354944	4576	83	4492
PB00	PB. Soedirman Common	[ASSET] POWER INTAKE	313495	65	37468	276078	4823	576	4247
SK01	Siteki	[ASSET] CIRCUIT BREAKER	133461	27	9883	123590	4943	366	4577
PU01	Plumbungan	[ASSET] EXCITATION & AVR CONTROL	138275	25	10501	127775	5531	420	5111
KT04	Ketenger Unit 4	[ASSET] GOVERNOR SUMPTANK, PUMP & PRESSURE TANK	120267	21	2913	117360	5727	138	5588
LR00	Lambur Unit Common	[ASSET] JTM 20 KV	17745	3	284	17461	5915	94	5820
TL02	Tulis unit 2	[ASSET] COOLING WATER STRAINER	191070	30	17601	173484	6369	586	5782
TL01	Tulis unit 1	[ASSET] COOLING WATER STRAINER	194190	30	9058	185135	6473	301	6171
SD01	Sidorejo	[ASSET] POWER INTAKE	281852	31	4360	277506	9092	140	8951
PB01	PB. Soedirman unit 1	[ASSET] PLC GOVERNOR SYSTEM (ANDRITZ)	34233	3	2935	31298	11411	978	10432
GW01	Gunung Wugul 1	[ASSET] UNIT CONTROL AND PROTECTION SYSTEM	31378	2	465	30913	15689	232	15456
TL00	Tulis Common	[ASSET] POWER INTAKE	194280	12	3678	190611	16190	306	15884
GR01	Garung Unit 1	[ASSET] EXCITATION SYSTEM (EMERSON)	52185	3	647	51539	17395	215	17179
LR02	Lambur Unit 2	[ASSET] PROTECTIONT EQUIPMENT UNIT CONTROL AND PROTECTION SYSTEM	17745	1	67	17678	17745	67	17678
JL03	Jelok Unit 3	[ASSET] Excitation & AVR control	92500	5	710	91793	18500	142	18358
KD01	Kedung Ombo	[ASSET] GOVERNOR HYDRAULIK SYSTEM	282170	14	69976	212202	20155	4998	15157
JL02	Jelok Unit 2	[ASSET] Excitation & AVR control (Modicon)	92528	4	392	92138	23132	98	23034
PB02	PB. Soedirman unit 2	[ASSET] COOLING WATER STRAINER	312702	13	16944	295762	24054	1303	22750
KG03	Ketenger Unit 3	[ASSET] GUIDE VANE	218331	9	4836	213500	24259	537	23722
KG02	Ketenger Unit 2	[ASSET] EXCITATION & AVR CONTROL	251930	10	1680	250258	25193	168	25025
GR02	Garung Unit 2	[ASSET] EXCITATION SYSTEM (EMERSON)	52186	2	250	51936	26093	125	25968
JL00	Jelok Common	[ASSET] PMT Kopel A (SCHNEIDER ELECTRIC)	52592	2	979	51613	26296	489	25806
GR00	Garung Common	[ASSET] HMI CONTROL ROOM (SCHNEIDER)	28113	1	72	28041	28113	72	28041
PB03	PB. Soedirman unit 3	[ASSET] GUIDE VANE	314720	10	3943	310778	31472	394	31077
WD01	Wadaslintang Unit 1	[ASSET] EXCITATION & AVR CONTROL	315580	10	6168	309416	31558	616	30941
GW02	Gunung Wugul 2	[ASSET] MAIN TRANSFORMATOR 2500 KVA 20/6,3 KV	33009	1	15	32994	33009	15	32994
TM01	Timo Unit 1	[ASSET] GOVERNOR SUMP TANK, PUMPS AND PRESSURE TANK (GOVERNOR HYDRAULIC SYSTEM)	549744	16	36800	512953	34359	2300	32059

Untuk mendapatkan nilai MTBF, MTTR & MTTF pada tabel Tabel 4.1 dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$MTBF = \frac{Jam\ operasi\ (A)}{Jumlah\ Gangguan\ (B)}$$

$$MTTR = \frac{Total\ jam\ gangguan\ (C)}{Jumlah\ Gangguan\ (B)}$$

$$MTTF = \frac{Total\ jam\ antar\ gangguan\ (D)}{Jumlah\ Gangguan\ (B)}$$

Data yang dikompilasi mencakup berbagai aset penting pada sejumlah unit pembangkit listrik tenaga air (PLTA), yang tersebar di beberapa lokasi seperti PB. Soedirman, Garung, Gunung Wugul, Jelok, Ketenger, Lambur, Pejengkolan, dan lain-lain. Informasi yang dianalisis meliputi jumlah gangguan, total jam gangguan, total jam antar gangguan, serta parameter keandalan seperti MTBF (*Mean Time Between Failure*), MTTR (*Mean Time To Repair*), dan MTTF (*Mean Time To Failure*). Untuk melihat keseluruhan Asset dilihat pada lampiran 1 sampai 17.

a. Tingkat Gangguan dan Keandalan

Beberapa aset menunjukkan tingkat keandalan yang tinggi dengan jumlah gangguan yang rendah serta MTBF dan MTTF yang tinggi. Contohnya:

- PB. Soedirman Unit 3 – GUIDE VANE: Memiliki hanya 1 gangguan dengan MTBF sebesar 310778 jam, MTTR rendah (13 jam), serta MTTF sebesar 310765 jam.
- Ketenger Unit 2 – EXCITATION & AVR CONTROL: Juga hanya mengalami 1 gangguan dengan MTBF sebesar 250158 jam dan MTTF yang hampir sama, menunjukkan performa sangat andal.

Namun, terdapat beberapa aset yang mencatat frekuensi gangguan relatif tinggi, seperti:

- Pejengkolan – GOVERNOR ACTUATOR, MAIN CONTROL SYSTEM: Dengan 35 gangguan dan MTBF 14117 jam, meskipun jumlah gangguan tergolong tinggi, nilai MTBF masih cukup baik.
- Ketenger Unit 4 – GOVERNOR SUMPTANK, PUMP & PRESSURE TANK: Mengalami 21 gangguan dengan MTTR tinggi (138 jam), yang menunjukkan waktu pemulihan yang cukup lama.

b. Efisiensi Perbaikan

MTTR mencerminkan efisiensi proses perbaikan. Unit seperti:

- Gunung Wugul Unit 1 – CONTROL AND PROTECTION SYSTEM: Memiliki MTTR sangat rendah (1 jam), menunjukkan kemampuan

tim pemeliharaan yang sangat baik dalam menangani gangguan secara cepat.

- Sempor – FEEDER EXPRESS 20 KV GB3 memiliki MTTR cukup tinggi (56 jam), yang mengindikasikan adanya kendala dalam proses perbaikan atau kompleksitas sistem.

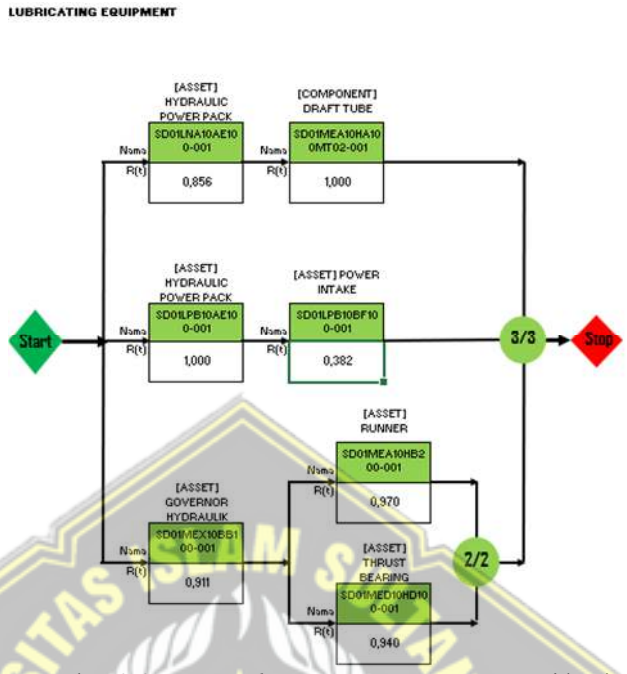
4.1.4 Modeling *Reliability Block Diagram* (RBD)

Pemodelan Reliability Block Diagram (RBD) dilakukan untuk menggambarkan hubungan logika antar komponen utama dalam sistem pembangkit berdasarkan konfigurasi operasional yang ada di unit PLTA PT PLN Indonesia Power UBP Mrica. RBD digunakan sebagai alat bantu dalam menganalisis tingkat keandalan sistem secara menyeluruh, di mana setiap blok dalam diagram merepresentasikan fungsi dari suatu peralatan atau subsistem yang berkontribusi terhadap keberlangsungan operasi pembangkit.

Dalam proses pemodelan ini, sistem diklasifikasikan ke dalam struktur blok seri dan paralel sesuai dengan kondisi aktual di lapangan. Komponen yang tersusun secara seri diasumsikan akan menyebabkan kegagalan sistem apabila salah satu komponen mengalami gangguan, sedangkan konfigurasi paralel memungkinkan redundansi jika salah satu komponen gagal. Proses pemodelan dilakukan berdasarkan struktur dan konfigurasi masing-masing unit pembangkit yang terdiri dari komponen-komponen utama seperti turbin, generator, trafo utama, sistem kontrol, dan peralatan pendukung lainnya.

Model RBD dibangun menggunakan referensi teknis dari dokumen P&ID dan data peralatan pada sistem ERP Maximo. Setiap unit pembangkit dimodelkan secara terpisah untuk kemudian dianalisis kontribusinya terhadap keandalan sistem secara keseluruhan.

Gambar 4. 1 : RBD System PLTA Sidorejo



Gambar 4. 2 : RBD *Lubricating Equipment* PLTA Sidorejo

Rangkaian pemodelan RBD untuk setiap unit seperti contoh pada gambar 4.1 RBD *System* PLTA Sidorejo dan subsistem seperti contoh pada gambar 4.2 RBD *Lubricating Equipment* PLTA Sidorejo, ditampilkan pada Lampiran 18 sampai dengan Lampiran 34. Diagram tersebut memuat struktur blok keandalan yang telah disusun berdasarkan fungsi operasional komponen, serta konfigurasi yang menggambarkan kemungkinan jalur aliran keberhasilan sistem. Hasil pemodelan juga akan digunakan dalam integrasi metode SERP untuk mendukung pengambilan keputusan pada aspek O&M maupun investasi modal.

Berdasarkan hasil analisis RBD terhadap 32 unit pembangkit pada berbagai PLTA (Tabel 4.2), ditemukan bahwa beberapa unit menunjukkan nilai keandalan sistem dan aset yang tergolong rendah. Nilai RBD yang rendah mencerminkan tingginya risiko gangguan fungsi pada sistem maupun peralatan terkait, yang dapat berdampak pada ketidakstabilan operasi unit pembangkit secara keseluruhan.

Beberapa temuan penting mengenai unit dengan nilai RBD terendah antara lain:

i. Sempor memiliki nilai RBD unit sangat rendah yaitu 0,013, dengan sistem kritis berupa Sistem Transmisi. Sub-sistem Unit Auxiliary Transformer dan aset *Feeder Express* 20 kV GB3 menunjukkan nilai keandalan hanya 0,079, yang menandakan perlunya perhatian serius pada sistem distribusi daya internal.

ii. PB. Soedirman Unit 1, 2 dan 3 juga termasuk dalam kategori unit dengan nilai keandalan rendah (RBD unit masing-masing 0,005 dan 0,002), terutama pada sistem *Headrace* dan *Power Intake Gate*. Nilai keandalan aset pada kedua unit hanya berkisar antara 0,126 – 0,162.

iii. Plumbungan menunjukkan nilai RBD unit sebesar 0,062, yang tergolong rendah dibandingkan unit lain dalam kategori *Generator System*. Sub-sistem kritis yang teridentifikasi adalah Exciter Set dengan nilai RBD sub-sistem 0,132. Aset paling kritis dalam sistem ini adalah *Excitation & AVR Control*, dengan nilai RBD aset hanya 0,350. Nilai ini mengindikasikan bahwa sistem eksitasi dan pengendali tegangan otomatis memiliki risiko tinggi terhadap gangguan fungsi *generator*.

iv. Ketenger Unit 4 menunjukkan nilai RBD sistem sebesar 0,030, dan nilai RBD aset hanya 0,217. Sistem yang paling tidak andal adalah *Lubricating Oil System*, dengan sub-sistem kritis *Oil Pump*, *Tank*, *Piping* and Valve (Fluid Supply). Aset yang terkait, yaitu Governor Sumptank, Pump & Pressure Tank, berpotensi menjadi titik lemah yang signifikan dalam menjaga keandalan unit.

v. Sidorejo dan Tapen masing-masing menunjukkan nilai RBD unit 0,004 dan 0,000, keduanya berfokus pada *Lubricating Oil System* dan Electro *Hydraulic Oil System*. Aset kritis yang teridentifikasi adalah *Power Intake* dan *Bearing Lubrication*, dengan nilai RBD aset masing-masing 0,382 dan 0,350.

Tabel 4. 2 : Rangkuman RBD Nilai Terendah

No.	Nama PLTA	Nilai RBD Unit	System Nilai terkecil	Nilai RBD System	Sub System Nilai Terkecil	Nilai RBD Sub system	Asset Nilai Terkecil	Nilai RBD Asset
1	Garung Unit 1	0,109	Generator System	0,537	EXCITER SET	0,604	[ASSET] Excitation System (Emerso)	0,604
2	Garung Unit 2	0,208	Generator System	0,635	EXCITER SET	0,715	[ASSET] Excitation System (Emerso)	0,715
3	Jelok Unit 1	0,163	System Transmition	0,463	Pipeline & Isolator phase busbar	0,616	[ASSET] PMT Kopel A (SCHNEIDER ELECTRIC)	0,717
4	Jelok Unit 2	0,085	System Transmition	0,463	Pipeline & Isolator phase busbar	0,616	[ASSET] PMT Kopel A (SCHNEIDER ELECTRIC)	0,717
5	Jelok Unit 3	0,061	System Transmition	0,463	Pipeline & Isolator phase busbar	0,616	[ASSET] PMT Kopel A (SCHNEIDER ELECTRIC)	0,717
6	Jelok Unit 4	0,144	System Transmition	0,463	Pipeline & Isolator phase busbar	0,616	[ASSET] PMT Kopel A (SCHNEIDER ELECTRIC)	0,717
7	Kedungombo	0,002	Lubricating & Oil System	0,16	OIL PUMP, TANK, PIPING AND VALVE (FLUID SUPPLY)	0,298	[ASSET] GOVERNOR HYDRAULIK SYSTEM	0,6475
8	Ketenger Unit 1	0,294	GENERATOR SYSTEM U1	0,651	AUTOMATIC VOLTAGE REGULATOR (AVR) GENERATOR	0,841	[ASSET] EXCITATION & AVR CONTROL	0,841
9	Ketenger Unit 2	0,278	GENERATOR SYSTEM U2	0,465	AUTOMATIC VOLTAGE REGULATOR (AVR) GENERATOR	0,698	[ASSET] EXCITATION & AVR CONTROL	0,706
10	Ketenger Unit 3	0,159	TURBINE SYSTEM U3	0,486	TURBINE	0,548	[ASSET] GUIDE VANE	0,697
11	Ketenger Unit 4	0,000	LUBRICATING OIL SYSTEM U4	0,030	OIL PUMP, TANK, PIPING AND VALVE (FLUID SUPPLY)	0,140	[ASSET] GOVERNOR SUMPTANK, PUMP & PRESSURE TANK	0,217
12	Lambur Unit 1	0,610	HEADRACE SYSTEM	0,610	POWER INTAKE	0,610	[ASSET] PENSTOCK	0,610
13	Lambur Unit 2	0,139	INSTRUMENTATION AND CONTROL SYSTEM U2	0,61	GENERATOR RELAY PROTECTION	0,61	[ASSET] PROTECTIONT EQUIPMENT UNIT CONTROL AND PROTECTION SYSTEM	0,61
14	PB. Soedirman Unit 1	0,002	HEADRACE SYSTEM	0,149	POWER INTAKE	0,153	[ASSET] POWER INTAKE GATE	0,162
15	PB. Soedirman Unit 2	0,005	HEADRACE SYSTEM	0,149	POWER INTAKE	0,153	[ASSET] POWER INTAKE GATE	0,162
16	PB. Soedirman Unit 3	0,007	HEADRACE SYSTEM	0,149	POWER INTAKE	0,153	[ASSET] POWER INTAKE GATE	0,162
17	Pejengkolan	0,272	GENERATOR SYSTEM	0,69	GENERATOR RELAY PROTECTION	0,884	[ASSET] MEASUREMENT AND CONTROL DEVICES	0,911
18	Sempor	0,013	SISTEM TRANSMISI	0,077	Unit Auxiliary Transformer	0,079	[ASSET] Feeder Express 20 KV GB3	0,079
19	Sidorejo	0,004	LUBRICATING OIL SYSTEM	0,212	LUBRICATING EQUIPMENT	0,271	[ASSET] POWER INTAKE	0,382
20	Siteki	0,000	LUBRICATING OIL SYSTEM	0,011	LUBRICATING EQUIPMENT	0,073	[ASSET] GUIDE VANE	0,288
21	Timo Unit 1	0,206	LUBRICATING OIL SYSTEM	0,55	OIL PUMP, TANK, PIPING AND VALVE (FLUID SUPPLY)	0,555	[ASSET] GOVERNOR SUMP TANK, PUMPS AND PRESSURE TANK (GOVERNOR HYDRAULIC SYSTEM)	0,775
22	Timo Unit 2	0,361	GENERATOR SYSTEM	0,775	ROTOR GENERATOR	0,895	[ASSET] GENERATOR AIR COOLER	0,909
23	Timo Unit 3	0,260	GENERATOR TRANSFORMER	0,709	GENERATOR TRANSFORMER	0,756	[ASSET] MAIN TRANSFORMER (TRAFINDO)	0,819
24	Tulis Unit 1	0,000	GENERATOR SYSTEM U1	0,051	ROTOR GENERATOR	0,216	[ASSET] TRHUST BEARING GENERATOR	0,296
25	Tulis Unit 2	0,000	GENERATOR SYSTEM U2	0,073	ROTOR GENERATOR	0,369	[ASSET] TRHUST BEARING GENERATOR	0,509
26	Wadaslintang Unit 1	0,038	GENERATOR SYSTEM	0,411	AUTOMATIC VOLTAGE REGULATOR (AVR) GENERATOR	0,737	[ASSET] EXCITATION & AVR CONTROL	0,758
27	Wadaslintang Unit 2	0,051	BALANCE OF PLANT	0,499	COOLING SYSTEM	0,557	[ASSET] GENERATOR AIR COOLER	0,895
28	Wonogiri Unit 1	0,587	GENERATOR SYSTEM U1	0,844	ROTOR GENERATOR	0,930	[ASSET] GENERATOR AIR COOLER	0,953
29	Wonogiri Unit 2	0,461	GENERATOR SYSTEM U2	0,730	AUTOMATIC VOLTAGE REGULATOR (AVR) GENERATOR	0,865	[ASSET] EXCITATION DAN AVR CONTROL	0,886
30	Klambu	0,243	LUBRICATING OIL SYSTEM	0,612	LUBRICATING EQUIPMENT	0,713	[ASSET] POWER INTAKE	0,832
31	Plumbungan	0,000	GENERATOR SYSTE	0,007	EXCITER SET	0,132	[ASSET] EXCITATION & AVR CONTROL	0,205
32	Tapen	0,000	ELECTRO HYDRAULIC OIL SYSTEM UNIT	0,064	AC LUBRICATING OIL PUMP	0,099	[ASSET] BEARING LUBRICATION	0,350

Dari identifikasi ini, terlihat bahwa sebagian besar unit dengan nilai RBD terendah berada pada sistem *Lubrication* dan *Transmission*. Kedua sistem ini, meskipun bukan sistem utama seperti *turbine* atau *generator*, memiliki peran penting dalam mendukung operasi andal unit pembangkit. Oleh karena itu, rekomendasi utama yang dapat disusun adalah:

- Peninjauan ulang jadwal dan strategi pemeliharaan *preventif* pada sistem pelumasan dan transmisi.
- Penggantian atau *rehabilitasi* peralatan kritis seperti *pump*, *valve*, dan *auxiliary transformer*.
- Prioritaskan investasi pada sistem dengan nilai RBD terendah dalam rencana *Capital Investment* tahunan.

Temuan-temuan ini akan dijadikan dasar dalam penentuan prioritas peralatan dan sistem yang memerlukan intervensi teknis maupun pendanaan dalam kerangka *Asset Health Management* secara menyeluruh.

4.1.5 Analisis *Weilbull*

Setelah dilakukan pemodelan *Reliability Block Diagram* (RBD) untuk setiap unit dan subsistem pembangkit, tahap selanjutnya adalah menganalisis karakteristik keandalan komponen berdasarkan data historis kegagalan. Salah satu metode statistik yang digunakan dalam analisis ini adalah *Weibull Analysis*, yang memiliki kemampuan untuk menggambarkan pola kegagalan komponen secara lebih akurat, baik untuk sistem yang bersifat *repairable* maupun *non-repairable*.

Analisa Weibull dilakukan untuk menghitung dua parameter utama, yaitu β (*beta*) sebagai shape parameter dan η (*eta*) sebagai scale parameter. Nilai beta memberikan informasi mengenai jenis pola kegagalan, apakah bersifat *infant mortality*, *random failure*, atau *wear-out*. Sementara itu, eta menunjukkan waktu karakteristik di mana sekitar 63,2% dari populasi komponen diperkirakan mengalami kegagalan.

Data input dalam analisis ini diperoleh dari riwayat pekerjaan pemeliharaan dan perbaikan pada sistem ERP *Maximo*, berupa waktu antara instalasi hingga terjadinya kegagalan komponen (Gambar 4.3). Hasil analisis *Weibull* ini digunakan untuk memperkirakan *Mean Time Between Failures* (MTBF) dan *reliability function* R(t) dari masing-masing aset, yang kemudian menjadi dasar dalam perumusan strategi pemeliharaan berbasis keandalan dan perencanaan investasi jangka panjang.

Analisis Weibull merupakan metode statistik yang *powerful* untuk memprediksi keandalan (*reliability*) suatu aset atau komponen. Untuk mendapatkan hasil analisis yang akurat dan bermanfaat, diperlukan data yang lengkap dan terstruktur dengan baik. Berikut penjelasan rinci tentang data yang diperlukan:

1) Data Waktu Kegagalan (*Time-to-Failur*e Data)

Data ini merupakan elemen paling kritis dalam analisis *Weibull*. Contoh data yang dibutuhkan:

- Waktu operasi dari instalasi hingga terjadinya kegagalan pertama
- Durasi antara kegagalan beruntun (untuk analisis *repairable systems*)
- Satuan waktu yang konsisten (jam, hari, siklus operasi, dll)

2) Data Suspensi (*Suspended/Censored Data*)

Data ini merepresentasikan peralatan yang:

- Masih beroperasi normal saat analisis dilakukan
- Mengalami kegagalan karena mode lain yang tidak relevan
- Dikeluarkan dari pengamatan sebelum waktunya

5) Informasi Populasi

- Jumlah total unit yang diamati
- Jumlah unit yang mengalami kegagala
- Jumlah unit yang masih beroperasi (suspended)

SITE MRC

ASSETNUM SK01CWA10GH100-001

DESCRIPTION [ASSET] MAIN CONTROL PANELS

WONUM	WORK TYPE	REPORT DATE	ACTUAL START	START GANGGUAN	FINISH GANGGUAN	JAM GANGGUAN	JAM ANTAR GANGGUAN
201180650	CM	Apr 16, 2012, 8.04 AM	Apr 11, 2012, 10.32 AM	Apr 11, 2012, 10.32 AM	May 10, 2012, 3.47 PM	702	24490
201296869	CM	Jan 21, 2013, 8.41 AM	Sep 17, 2013, 2.15 PM	Sep 17, 2013, 2.15 PM	Dec 16, 2013, 4.33 PM	2163	11878
201511265	CM	Jan 22, 2015, 10.38 AM	Jan 26, 2015, 9.26 AM	Jan 26, 2015, 9.26 AM	Feb 5, 2015, 11.05 AM	242	9736
201513223	CM	Mar 13, 2015, 10.18 AM	May 18, 2015, 10.15 AM	May 18, 2015, 10.15 AM	May 22, 2015, 4.35 PM	103	2447
201618882	EM	Nov 9, 2016, 3.27 PM	Nov 9, 2016, 2.00 PM	Nov 9, 2016, 3.27 PM	Dec 5, 2016, 3.57 PM	625	12886
201816094	CM	Jun 28, 2018, 7.55 AM	Oct 17, 2018, 7.10 AM	Oct 17, 2018, 7.10 AM	Oct 21, 2018, 7.40 AM	97	16335
202122481	EM	Nov 8, 2021, 11.49 AM	Nov 1, 2021, 3.00 PM	Nov 8, 2021, 11.49 AM	Dec 2, 2021, 9.25 AM	574	26740
202217941	EM	Jul 30, 2022, 7.49 AM	Jul 29, 2022, 7.00 PM	Jul 30, 2022, 7.49 AM	Aug 4, 2022, 4.10 PM	129	5758

Gambar 4. 3 : Data Maximo *Hystorical Brake Down Asset*

4.1.6 Evaluasi Asset dengan Metode SERP dan MPI

Setelah dilakukan analisis keandalan melalui pendekatan *Reliability Block Diagram* (RBD) dan *Weibull*, tahap selanjutnya adalah melakukan evaluasi terhadap aset pembangkit menggunakan metode S*ystem & Equipment*

Reliability Prioritization (SERP) yang dikombinasikan dengan pendekatan *Maintenance Priority Index* (MPI). Evaluasi ini bertujuan untuk menentukan tingkat prioritas pemeliharaan dan investasi berdasarkan tingkat kritikalitas dan keandalan masing-masing aset.

Metode SERP digunakan untuk mengklasifikasikan sistem dan peralatan berdasarkan parameter-parameter kuantitatif seperti frekuensi kegagalan, waktu henti (*downtime*), dampak terhadap produksi, serta tingkat kesulitan pemeliharaan. Setiap parameter dinilai dan diberi bobot sesuai dengan tingkat pengaruhnya terhadap keberlangsungan operasi pembangkit.

Sementara itu, *Maintenance Priority Index* (MPI) digunakan sebagai representasi numerik dari tingkat urgensi pemeliharaan aset. Nilai MPI dihitung berdasarkan hasil integrasi antara data RBD, hasil analisis *Weibull*, dan indikator performa teknis lainnya. Semakin tinggi nilai MPI suatu aset, semakin tinggi pula urgensi tindakan pemeliharaan atau penggantian aset tersebut.

Melalui integrasi metode SERP dan MPI, proses pengambilan keputusan dalam pemeliharaan dan perencanaan investasi dapat dilakukan secara lebih terarah, objektif, dan berbasis data historis yang terukur. Hasil evaluasi ini selanjutnya digunakan untuk menyusun rekomendasi strategi O&M dan alokasi *Capital Investment secara prioritas*.

A. Evaluasi *System Criticality Ranking* (SCR)

   Evaluasi awal terhadap aset dilakukan menggunakan pendekatan *System Criticality Ranking* (SCR), yaitu metode klasifikasi kritikalitas berdasarkan lima kriteria utama: *Safety* (S), *Environmental* (E), *Cost* (C), *Commercial Availability* (CA), dan *Efficiency* (EFF). Setiap sistem dinilai apakah memiliki pengaruh langsung terhadap salah satu atau lebih dari kriteria tersebut.

   Pada konteks pembangkit listrik tenaga air (PLTA), kriteria *Efficiency* (EFF) tidak dimasukkan dalam penilaian SCR. Hal ini disebabkan oleh karakteristik PLTA yang memiliki efisiensi sistem relatif tinggi dan

konstan, serta keterbatasan data granular terkait pengukuran efisiensi tiap sistem secara individual. Oleh karena itu, dalam proses seleksi kritikalitas sistem, hanya digunakan empat parameter utama: S, E, C, dan CA.

Tabel 4. 3 : Contoh Evaluasi SCR

S/A	KKS Number	Deskripsi	Kriteria SCR										SCR
			S : Safety	E : Environmental	C : Cost	CA : Commercial Availability	E : Efficiency	S	E	C	CA	EFF	
S	BA	Power Transmission	High Safety Concern - injuries occur to personnel, lost time.	Notice of Violation	750 Juta - 1 M	Long Term Unit Shutdown (> 1 week)		8	5	6	9	#N/A	7,18
S	CE	Annunciation	No Safety Concern	No Effect	<10 Juta	No Effect		1	1	1	1	#N/A	1,00
S	CH	Protection	Low Safety Concern - Action taken to secure area.	Close Call (Non-Reportable)	500 Juta - 750 Juta	Long Term Unit Shutdown (> 1 week)		3	3	5	9	#N/A	5,57
S	CW	Control Rooms	No Safety Concern	No Effect	500 Juta - 750 Juta	Short Term Unit Shutdown (< 1 week)		1	1	5	8	#N/A	4,77
S	ME	Hydraulic Turbine Plant	Low Safety Concern - Action taken	No Effect	5 M - 10 M	Long Term Unit Shutdown		3	1	9	9	#N/A	6,56
S	MK	Generator Plant	High Safety Concern - injuries occur to personnel, lost time.	No Effect	5 M - 10 M	Long Term Unit Shutdown (> 1 week)		8	1	9	9	#N/A	7,53

Dari hasil evaluasi yang ditampilkan pada Tabel 4.3 SCR, beberapa sistem menunjukkan tingkat kritikalitas tinggi karena memenuhi lebih dari satu kriteria penting. Sebagai contoh:

- Sistem BA (*Power Transmission*) masuk dalam kategori kritikal karena berpengaruh terhadap aspek *Cost* dan *Commercial Availability*, yang mencerminkan bahwa kegagalan pada sistem ini dapat menyebabkan gangguan pengiriman daya dan kerugian produksi.
- Sistem CE (*Annunciation*) dan CH (*Protection*) dinilai kritis karena terkait langsung dengan *Safety* dan *Cost*, mengingat fungsinya dalam memberikan indikasi dini terhadap potensi bahaya serta perlindungan terhadap peralatan utama.
- Sistem MK (*Generator Plant*) dan ME (*Hydraulic Turbine Plant*) memiliki peran vital dalam menjaga kontinuitas pembangkitan, dan oleh karena itu dikategorikan sebagai sistem kritikal pada aspek *Safety*, *Commercial Availability*, dan *Cost*.

Hasil evaluasi SCR ini digunakan sebagai dasar awal untuk proses lanjutan dalam metode SERP-MPI, di mana prioritas pemeliharaan dan investasi akan ditentukan secara lebih rinci berdasarkan kombinasi antara nilai keandalan dan dampak operasional dari masing-masing sistem.

B. Evaluasi *Equipment Criticality Ranking* (ECR)

Evaluasi Equipment Criticality Ranking (ECR) dilakukan untuk menilai tingkat kritikalitas masing-masing aset pembangkit berdasarkan beberapa parameter operasional utama, yaitu: *Safety* (S), *Environmental* (E), *Cost* (C), dan *Commercial Availability* (CA). Setiap aset dinilai terhadap keempat aspek tersebut dan diberikan skor sesuai tingkat dampaknya terhadap operasi pembangkit apabila terjadi kegagalan fungsi.

Pada analisis ini, kriteria *Efficiency* (EFF) tidak digunakan dalam penilaian, mengingat sistem PLTA secara umum memiliki efisiensi yang relatif konstan, tinggi, dan sulit dibedakan secara granular pada *level* peralatan *individual*. Oleh karena itu, penilaian difokuskan pada dampak langsung yang lebih kritikal terhadap keberlangsungan dan keselamatan operasi pembangkit.

Tabel 4. 4 : Contoh Evaluasi ECR

S/A	KKS Number	Deskripsi	Kriteria ECR										ECR
			S : Safety	E : Environmental	C : Cost	CA : Commercial Availability	E : Efficiency	S	E	C	CA	EFF	
S	BA	Power Transmission											
A	GR01BAA10GA100-001	[ASSET] BUS BAR	Low Safety Concern - Action taken to secure area.	No Effect	<100 Juta	Short Term Unit Shutdown (< 1 week)		3	1	1	8	#N/A	4,33
A	GR01BAA10GT100-001	[ASSET] POTENTIAL TRANSFORMER	Low Safety Concern - Action taken to secure area.	No Effect	500 Juta - 2.5 M	Short Term Unit Shutdown (< 1 week)		3	1	3	8	#N/A	4,56
A	GR01BAA10GT200-001	[ASSET] CURRENT TRANSFORMERS FOR MEASURING & PROTECTION	Low Safety Concern - Action taken to secure area.	No Effect	500 Juta - 2.5 M	Short Term Unit Shutdown (< 1 week)		3	1	3	8	#N/A	4,56
A	GR01BAC10GS100-001	[ASSET] GENERATOR VACUM CIRCUIT BREAKER 2000A; 7000 V	Safety concerns - Possible doctor attended injuries.	No Effect	2.5 M - 5 M	Long Term Unit Shutdown (> 1 week)		5	1	4	9	#N/A	5,55
S	CE	Annunciation											
A	GR01CEA10EG100-001	[ASSET] UNIT ANNUNCIATOR PANEL	No Safety Concern	No Effect	<100 Juta	No Effect		1	1	1	1	#N/A	1,00
S	CH	Protection											
A	GR01CHA10EW100-001	[ASSET] GENERATOR PROTECTION	High Safety Concern, possible fatality, injuries occur to personnel	Close Call (Non-Reportable)	2.5 M - 5 M	Future Potential Loss of MW's		10	3	4	3	#N/A	5,79
A	GR01CHA10EW200-001	[ASSET] TRANSFORMATOR PROTECTION	High Safety Concern, possible fatality, injuries occur to personnel	Notice of Violation	2.5 M - 5 M	Future Potential Loss of MW's		10	5	4	3	#N/A	6,12
A	GR01CHA10EW300-001	[ASSET] PROTECTION AND SUPERVISION DEVICE	High Safety Concern, possible fatality, injuries occur to personnel	No Effect	500 Juta - 2.5 M	Future Potential Loss of MW's		10	1	3	3	#N/A	5,45

Berdasarkan hasil evaluasi ECR yang ditampilkan dalam tabel 4.4, beberapa temuan utama adalah sebagai berikut:

- Sistem *Power Transmission* (BA) memiliki aset dengan nilai ECR tinggi, khususnya pada *Generator Vacuum Circuit Breaker* (ECR = 5,55) yang menunjukkan tingkat kritikalitas signifikan dari sisi safety dan potensi *downtime* jangka panjang. Aset ini berpotensi menyebabkan *shutdown* unit lebih dari satu minggu jika terjadi kegagalan.

- Sistem *Protection* (CH) merupakan salah satu yang paling kritikal, dengan aset seperti *Generator Protection* (ECR = 5,79) dan *Transformer Protection* (ECR = 6,12) yang menunjukkan dampak sangat tinggi terhadap aspek *safety* dan *availability*. Hal ini mengindikasikan bahwa sistem proteksi memiliki risiko tinggi terhadap personel maupun potensi kehilangan kapasitas pembangkitan apabila tidak berfungsi.
- Di sisi lain, sistem *Annunciation* (CE) memiliki nilai ECR yang relatif rendah (ECR = 1,00), karena tidak memberikan dampak langsung terhadap keselamatan, lingkungan, maupun keberlangsungan pembangkitan. Sistem ini cenderung bersifat pendukung dan informatif.

Pendekatan ECR ini memberikan panduan awal dalam penentuan prioritas pemeliharaan dan penggantian aset, serta menjadi dasar penting dalam penyusunan *Maintenance Priority Index* (MPI) yang lebih terintegrasi. Aset dengan nilai ECR tinggi secara langsung masuk dalam kategori peralatan prioritas tinggi untuk evaluasi strategi O&M dan investasi jangka panjang.

C. Evaluasi *Asset Criticality Ranking (ACR), ACR Rank & Maintenance Priority Index* (MPI)

Setelah dilakukan evaluasi terhadap sistem dan peralatan menggunakan pendekatan SCR dan ECR, langkah berikutnya adalah melakukan pengukuran *Asset Criticality Ranking* (ACR) untuk mengidentifikasi aset-aset dengan tingkat kritikalitas tertinggi berdasarkan kombinasi berbagai parameter teknis dan operasional. ACR dihitung dengan mengintegrasikan sejumlah *variabel*, seperti *frekuensi* gangguan (jumlah gangguan), kondisi fisik peralatan, status perbaikan, serta skor RMS (*Risk Management Score*).

- ACR dan ACR Rank

Dari hasil perhitungan ACR, diperoleh peringkat aset berdasarkan tingkat risikonya terhadap keberlangsungan operasi pembangkit. Nilai ACR yang tinggi menunjukkan bahwa suatu aset memiliki pengaruh besar terhadap unjuk kerja sistem, baik dari sisi reliabilitas, ketersediaan (*availability*), maupun risiko finansial.

Beberapa aset dengan nilai ACR tertinggi antara lain:

- [ASSET] *STATOR* dengan ACR sebesar 49,26 dan menempati peringkat pertama (ACR Rank 1),
- Diikuti oleh [ASSET] *ROTOR* (ACR 49,01),
- [ASSET] *EXCITATION SYSTEM* (EMERSON) (ACR 43,28),
- Dan [ASSET] *TURBIN SHAFT AND RUNNER* (ACR 43,00).

Aset-aset ini tergolong dalam *Top* 10% berdasarkan hasil peringkat, sehingga menjadi fokus utama dalam perencanaan pemeliharaan strategis maupun program investasi modal (*Capital Invesment*).

Tabel 4. 5 : ACR & ACR Rank

ACR Rank PLTA GRG Unit 1						TOP 10%
KKS Number	Deskripsi	SCR	ACR	ACR Rank	%	TOP 30%
GR01MKA10HA100-001	[ASSET] STATOR	7,53	49,26	1	3,85%	
GR01MKA10HB100-001	[ASSET] ROTOR	7,53	49,26	1	3,85%	
GR01MKC10GJ100-002	[ASSET] EXCITATION SYSTEM (EMERSON)	7,53	43,28	2	7,69%	
GR01MEA10HB100-001	[ASSET] TURBIN SHAFT AND RUNNER	6,56	43,00	3	11,54%	
GR01MKC10GU100-001	[ASSET] THYRISTOR SET	7,53	40,57	4	15,38%	
GR01MKC10GT100-002	[ASSET] EXCITATION TRANSFORMER (EMERSON)	7,53	40,57	4	15,38%	
GR01BAC10GS100-001	[ASSET] GENERATOR VACUM CIRCUIT BREAKER 2000A; 7000 V	7,18	39,79	5	19,23%	
GR01MEX10AA100-001	[ASSET] GOVERNOR ACTUATOR, MAIN CONTROL SYSTEM	6,56	38,79	6	23,08%	
GR01MEB10AA200-001	[ASSET] INLET VALVE	6,56	38,52	7	26,92%	
GR01MKD10HD100-001	[ASSET] UPPER GUIDE BEARING	7,53	37,67	8	30,77%	
GR01MKD10HD200-001	[ASSET] LOWER GUIDE BEARING	7,53	37,67	8	30,77%	
GR01MKD10HD300-001	[ASSET] THRUST BEARING	7,53	37,67	8	30,77%	
GR01MEX10BB100-001	[ASSET] GOVERNOR SUMP TANK, PUMPS AND PRESSURE TANK (	6,56	37,53	9	34,62%	
GR01MKD10MV100-001	[ASSET] LUBRICATING SYSTEM FOR UPPER AND TRUSH BEARIN	7,53	34,93	10	38,46%	
GR01MKD10MV200-001	[ASSET] LUBRICATING SYSTEM FOR LOWER BEARING	7,53	34,93	10	38,46%	
GR01CHA10EW200-001	[ASSET] TRANSFORMATOR PROTECTION	5,57	34,10	11	42,31%	
GR01MEA10AA100-001	[ASSET] GUIDE VANE	6,56	33,92	12	46,15%	
GR01MEX10AA200-001	[ASSET] GOVERNOR SERVO MOTOR	6,56	33,92	12	46,15%	
GR01MKA10AC100-001	[ASSET] GENERATOR AIR COOLER	7,53	33,27	13	50,00%	

- *Maintenance Priority Index* (MPI)

MPI adalah indeks gabungan yang mengintegrasikan hasil evaluasi dari SCR, ECR, ACR, serta kondisi aktual aset untuk menentukan prioritas pemeliharaan yang paling mendesak. Semakin tinggi nilai MPI, maka

semakin besar urgensi untuk melakukan tindakan pemeliharaan atau penggantian terhadap aset tersebut.

Pada tabel 4.5 & 4.6, aset yang berada pada kuadran nilai ACR tinggi dan kondisi peralatan rendah memiliki nilai MPI paling besar dan ditandai sebagai kandidat utama untuk dilakukan intervensi teknis segera. Hal ini bertujuan untuk meminimalkan risiko *downtime* yang tidak direncanakan, menjaga keselamatan operasi, dan menghindari kerugian biaya akibat gangguan berulang untuk detail dapat dilihat pada lampiran 64 sampai 105.

Tabel 4. 6 : ACR & MPI

S/A	KKS Number	Deskripsi	SCR	ECR	ACR	AW	Condition Status	∑ Gangguan	Repair Status	RMS	MPI
S	BA	Power Transmission	7,18								
A	GR01BAA10GA100-001	[ASSET] BUS BAR		4,33	31,07	HIJAU	1,00	1	1,00	1,41	43,95
A	GR01BAA10GT100-001	[ASSET] POTENTIAL TRANSFORMER		4,56	32,69	HIJAU	1,00	0	1,00	1,41	46,23
A	GR01BAA10GT200-001	[ASSET] CURRENT TRANSFORMERS FOR MEASURING & PROTECTION		4,56	32,69	HIJAU	1,00	0	1,00	1,41	46,23
A	GR01BAC10GS100-001	[ASSET] GENERATOR VACUM CIRCUIT BREAKER 2000A; 7000 V		5,55	39,79	HIJAU	1,00	0	1,00	1,41	56,28
S	CE	Annunciation	1,00								
A	GR01CEA10EG100-001	[ASSET] UNIT ANNUNCIATOR PANEL		1,00	1,00	HIJAU	1,00	0	1,00	1,41	1,41
S	CH	Protection	5,57								
A	GR01CHA10EW100-001	[ASSET] GENERATOR PROTECTION		5,79	32,23	HIJAU	1,00	1	1,00	1,41	45,57
A	GR01CHA10EW200-001	[ASSET] TRANSFORMATOR PROTECTION		6,12	34,10	HIJAU	1,00	0	1,00	1,41	48,22
A	GR01CHA10EW300-001	[ASSET] PROTECTION AND SUPERVISION DEVICE		5,45	30,37	HIJAU	1,00	1	1,00	1,41	42,95
S	CW	Control Rooms	4,77								
A	GR01CWF10GH100-001	[ASSET] UNIT CONTROL PANEL		2,65	12,62	HIJAU	1,00	2	1,00	1,41	17,85

4.2 Pengolahan Data

Pengolahan data merupakan tahap lanjutan setelah seluruh informasi yang dibutuhkan berhasil dikumpulkan melalui observasi, wawancara, dokumentasi teknis, dan ekstraksi data historis dari sistem ERP Maximo milik PT PLN Indonesia Power UBP Mrica. Data yang diperoleh meliputi riwayat gangguan peralatan, waktu antara kegagalan, waktu perbaikan, serta struktur sistem pembangkit dan subsistem pendukungnya.

Pada tahap ini, seluruh data tersebut diolah dan dianalisis dengan menggunakan pendekatan yang telah dijelaskan pada bab sebelumnya, yaitu:

- *Reliability Block Diagram* (RBD) untuk memetakan hubungan antar komponen secara logis,
- Analisis *Weibull* untuk mengetahui karakteristik kegagalan dan menghitung parameter keandalan (β, η, MTBF), serta
- Metode SERP dan MPI untuk menentukan prioritas pemeliharaan dan alokasi investasi berdasarkan tingkat kritikalitas aset.

Proses pengolahan dilakukan secara sistematis menggunakan bantuan perangkat lunak seperti *Microsoft Excel*, distribusi statistik, serta visualisasi diagram dan grafik untuk memudahkan interpretasi. Tujuan dari tahap ini adalah untuk memperoleh informasi yang akurat dan relevan sebagai dasar dalam penentuan strategi O&M dan rekomendasi investasi jangka panjang.

Hasil dari pengolahan data ini akan disajikan dalam bentuk tabel, grafik, dan penilaian kuantitatif yang selanjutnya dibahas secara rinci dalam subbab berikutnya.

4.2.1 Deskripsi Data Historis

Data yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari sistem *Enterprise Resource Planning* (ERP) *Maximo* milik PT PLN Indonesia Power UBP Mrica, yang mencatat seluruh aktivitas pemeliharaan, pekerjaan korektif, serta riwayat instalasi dan penggantian komponen pada unit pembangkit. Data ini mencakup periode tahun 2011 hingga 2024, dengan cakupan aset pada berbagai sistem utama pembangkit *seperti Generator, Turbin, Excitation System, Control System,* dan *Power Transmission*.

Data historis yang dikumpulkan mencakup elemen-elemen berikut:

- Tanggal instalasi peralatan: digunakan sebagai acuan awal perhitungan umur operasi.
- Tanggal kegagalan atau penggantian (*actual finish*): digunakan untuk menentukan waktu kegagalan (*time to failure*).
- Jenis pekerjaan: apakah bersifat *preventive, corrective*, atau *Emergency*.
- Frekuensi gangguan pada tiap aset: dihitung berdasarkan jumlah kejadian selama periode observasi.

- Durasi *downtime*: digunakan untuk estimasi MTTR (*Mean Time To Repair*).

Data kemudian diproses dan dikonversi menjadi format yang sesuai untuk analisis Weibull dan perhitungan keandalan. Salah satu variabel kunci yang diturunkan dari data historis adalah *Time to Failure* (TTF): yaitu selisih waktu antara tanggal instalasi dan tanggal kegagalan suatu komponen, dinyatakan dalam satuan hari atau jam.

Data historis ini disusun ke dalam format tabel untuk memudahkan proses analisis pada tahap selanjutnya. Contoh struktur data yang digunakan ditampilkan pada Gambar 4.3. Data historis ini berasal dari aset-aset yang telah dipilih berdasarkan hasil evaluasi nilai *reliability* yang rendah, dan digunakan sebagai dasar dalam analisis *Weibull*.

4.2.2 Pemodelan *Reliability Block Diagram* (RBD)

Pemodelan sistem menggunakan *Reliability Block Diagram* (RBD) dilakukan untuk memvisualisasikan hubungan antar komponen utama pembangkit dalam rangkaian keandalan. Diagram ini membantu menganalisis seberapa besar peran masing-masing komponen terhadap keberlangsungan fungsi sistem secara keseluruhan. Pada sistem pembangkit listrik tenaga air, model RBD digunakan untuk mewakili aliran logika dari *power intake* hingga *generator output*, termasuk sistem kontrol dan pendukung lainnya.

Pemodelan dilakukan berdasarkan data teknis struktur sistem pembangkit yang diperoleh dari dokumen *Piping and Instrumentation Diagram* (P&ID) serta hasil survei lapangan. Setiap sistem dimodelkan dalam konfigurasi seri, paralel, maupun gabungan, sesuai dengan karakteristik fungsional komponen:

- **Konfigurasi seri** menggambarkan bahwa kegagalan salah satu komponen menyebabkan kegagalan seluruh sistem.

- **Konfigurasi paralel** digunakan untuk sistem dengan elemen redundan yang dapat mengambil alih fungsi saat salah satu komponen gagal.

Dalam pemodelan ini, masing-masing unit pembangkit dimodelkan secara individual, dengan mempertimbangkan subsistem seperti:

- Sistem turbin dan pelumasan
- Sistem generator dan eksitasi
- Sistem kontrol dan proteksi
- Sistem transmisi daya

Diagram RBD lengkap untuk masing-masing unit dan sistem dapat dilihat pada Lampiran 18 hingga Lampiran 34, yang memuat representasi visual konfigurasi keandalan dan nilai parameter komponen berdasarkan hasil perhitungan *Weibull* sebelumnya.

Dari hasil pemodelan, diperoleh nilai *reliability* (R) untuk setiap sistem dan subsistem. Nilai-nilai ini digunakan untuk:

- Mengidentifikasi titik lemah (*botleneck*) dalam sistem
- Menentukan unit dengan keandalan tertinggi dan terendah
- Menjadi dasar dalam evaluasi *Maintenance Priority Index* (MPI) dan rekomendasi strategi O&M

Sebagai contoh, unit PB Soedirman Unit 3 memiliki nilai keandalan RBD tertinggi pada sistem *Instrumentation & Control sebesar* 0,884, sedangkan nilai terendah ditemukan pada sistem *Power Transmission* PLTA Sempor sebesar 0,013.

Hasil dari pemodelan RBD ini memberikan gambaran objektif mengenai prioritas teknis dari sisi struktur sistem, sebelum dikombinasikan dengan penilaian kritikalitas dan kondisi fisik peralatan pada tahap selanjutnya.

Berdasarkan hasil pemodelan *Reliability Block Diagram* (RBD) terhadap seluruh unit PLTA yang diamati, diketahui bahwa terdapat sejumlah aset yang memiliki kontribusi dominan terhadap rendahnya nilai RBD unit secara keseluruhan. Aset-aset ini teridentifikasi sebagai komponen kritis yang

menurunkan keandalan sistem dan menjadi titik lemah dalam konfigurasi RBD.

Secara umum, nilai RBD yang rendah pada suatu unit mengindikasikan bahwa terdapat satu atau lebih aset yang memiliki nilai reliabilitas individu yang sangat rendah, sehingga memengaruhi nilai total RBD sistem maupun unit. Beberapa temuan penting dari hasil evaluasi (tabel 4.7) adalah sebagai berikut:

- PLTA Tapen, PLTA Tulis Unit 1, dan PLTA Plumbungan menunjukkan nilai RBD unit sebesar 0,000, yang berarti sistem tidak memiliki jalur sukses pada konfigurasi blok akibat satu atau beberapa aset berkeandalan sangat rendah.
- Pada PLTA Tapen, sistem transmisi merupakan titik paling kritis dengan nilai RBD sistem hanya 0,046, dan aset bernilai terendah adalah Unit Auxiliary Transformer dengan nilai RBD hanya 0,061.
- Sistem *Headrace* pada PB Soedirman Unit 1 dan 2 memiliki nilai RBD sistem sebesar 0,149 dan 0,153, yang dipengaruhi oleh keandalan rendah dari *Power Intake Gate*. Aset ini sering kali mengalami gangguan dan memiliki tingkat kerusakan yang tinggi berdasarkan histori gangguan ERP.

Pada PLTA Siteki, aset *Lubricating Equipment* dan *Guide Vane* tercatat sebagai penyumbang nilai RBD sistem terendah (antara 0,073 – 0,115), yang menunjukkan potensi permasalahan pada sistem pelumasan dan mekanisme pengatur aliran air turbin.

Beberapa unit menunjukkan nilai RBD nol meskipun sistem utama seperti *Generator* atau *Turbin* yang digunakan termasuk sistem penting. Hal ini terjadi karena adanya satu subkomponen dengan RBD mendekati nol, seperti *Bearing Lubrication*, *Excitation AVR*, atau *Control Panel* yang sangat menentukan keberhasilan sistem secara keseluruhan.

Temuan ini menunjukkan bahwa dalam struktur RBD yang bersifat konfigurasi seri, kegagalan pada satu komponen saja akan menyebabkan nilai keseluruhan sistem turun drastis. Oleh karena itu, aset-aset dengan nilai RBD rendah perlu menjadi fokus utama dalam strategi pemeliharaan *preventif* maupun penggantian.

Untuk itu, hasil analisis ini akan dijadikan sebagai input utama dalam proses perhitungan *Maintenance Priority Index* (MPI), di mana aset-aset bernilai RBD rendah dan berdampak langsung terhadap operasional sistem akan diprioritaskan dalam rencana O&M maupun *Capital Investment*.

Tabel 4. 7 : Hasil Evaluasi RBD Asset-Aset yang mempengaruhi nilai RDB terkecil

No.	Nama PLTA	Nilai RBD Unit	System Nilai terkecil	Nilai RBD System	Sub System Nilai Terkecil	Nilai RBD Sub system	Asset Nilai Terkecil	Nilai RBD Asset
1	Tapen	0,000	SISTEM TRANSMISI	0,046	Unit Auxiliary Transformer	0,061	[ASSET] JTM 20 KV	0,069
2	Sempor	0,013	SISTEM TRANSMISI	0,077	Unit Auxiliary Transformer	0,079	[ASSET] Feeder Express 20 KV GB3	0,079
3	PB. Soedirman Unit 1	0,002	HEADRACE SYSTEM	0,149	POWER INTAKE	0,153	[ASSET] POWER INTAKE GATE	0,162
4	PB. Soedirman Unit 2	0,005	HEADRACE SYSTEM	0,149	POWER INTAKE	0,153	[ASSET] POWER INTAKE GATE	0,162
5	PB. Soedirman Unit 3	0,007	HEADRACE SYSTEM	0,149	POWER INTAKE	0,153	[ASSET] POWER INTAKE GATE	0,162
6	Siteki	0,000	GENERATOR TRANSFORMER	0,052	GENERATOR TRANSFORMER	0,083	[ASSET] CIRCUIT BREAKER	0,170
7	Plumbungan	0,000	GENERATOR SYSTEM	0,007	EXCITER SET	0,132	[ASSET] EXCITATION & AVR CONTROL	0,205
8	Ketenger Unit 4	0,000	LUBRICATING OIL SYSTEM U4	0,030	OIL PUMP, TANK, PIPING AND VALVE (FLUID SUPPLY)	0,140	[ASSET] GOVERNOR SUMPTANK, PUMP & PRESSURE TANK	0,217
9	Tulis Unit 2	0,000	COOLING WATER SYSTEM	0,103	COOLING WATER FILTER	0,253	[ASSET] COOLING WATER STRAINER	0,253
10	Tulis Unit 1	0,000	COOLING WATER SYSTEM	0,110	COOLING WATER FILTER	0,258	[ASSET] COOLING WATER STRAINER	0,258
11	Tulis Unit 1	0,000	BALANCE OF PLANT	0,177	COOLING SYSTEM	0,194	[ASSET] COOLING WATER STRAINER	0,258
12	Tulis Unit 2	0,000	BALANCE OF PLANT	0,177	COOLING SYSTEM	0,194	[ASSET] COOLING WATER STRAINER	0,258
13	Siteki	0,000	LUBRICATING OIL SYSTEM	0,011	LUBRICATING EQUIPMENT	0,073	[ASSET] GUIDE VANE	0,288
14	Siteki	0,000	TURBINE SYSTEM	0,078	TURBINE	0,108	[ASSET] GUIDE VANE	0,288
15	Tulis Unit 1	0,000	GENERATOR SYSTEM U1	0,051	ROTOR GENERATOR	0,216	[ASSET] TRHUST BEARING GENERATOR	0,296
16	Siteki	0,000	GENERATOR SYSTEM	0,038	AUTOMATIC VOLTAGE REGULATOR (AVR) GENERATOR &	0,237	[ASSET] EXCITATION & AVR CONTROL	0,328
17	Tapen	0,000	GENERATOR SYSTEM	0,072	ROTOR GENERATOR	0,114	[ASSET] BEARING LUBRICATION	0,350
18	Tapen	0,000	LUBRICATING OIL SYSTEM	0,002	LUBRICATING EQUIPMENT	0,043	[ASSET] BEARING LUBRICATION	0,350
19	Tapen	0,000	ELECTRO HYDRAULIC OIL SYSTEM UNIT	0,064	AC LUBRICATING OIL PUMP	0,099	[ASSET] BEARING LUBRICATION	0,350
20	Siteki	0,000	WATER IMPOUNDING	0,308	BENDUNG	0,308	[ASSET] POWER INTAKE	0,351
21	Siteki	0,000	HEADRACE SYSTEM	0,351	POWER INTAKE	0,351	[ASSET] POWER INTAKE	0,351
22	Sidorejo	0,004	LUBRICATING OIL SYSTEM	0,212	LUBRICATING EQUIPMENT	0,271	[ASSET] POWER INTAKE	0,382
23	Tulis Unit 1	0,000	ELECTRO HYDRAULIC OIL SYSTEM	0,246	ELECTRO HYDRAULIC OIL GOVERNOR CONTROL	0,323	[ASSET] PLC GOVERNOR	0,404
24	Tulis Unit 1	0,000	INSTRUMENTATION AND CONTROL SYSTEM	0,164	CONTROL & PROTECTION EQUIPMENT	0,236	[ASSET] PLC GOVERNOR	0,404
25	Tulis Unit 1	0,000	LUBRICATING OIL SYSTEM	0,073	LUBRICATING EQUIPMENT	0,115	[ASSET] GUIDE VANE	0,509
26	Tulis Unit 1	0,000	TURBINE SYSTEM	0,216	TURBINE	0,310	[ASSET] GUIDE VANE	0,509
27	Tulis Unit 2	0,000	GENERATOR SYSTEM U2	0,073	ROTOR GENERATOR	0,369	[ASSET] TRHUST BEARING GENERATOR	0,509
28	Plumbungan	0,000	COOLING WATER SYSTEM	0,531	COOLING WATER	0,531	[ASSET] COOLING WATER PUMP	0,531
29	Tulis Unit 1	0,000	HEADRACE SYSTEM	0,582	POWER INTAKE	0,582	[ASSET] POWER INTAKE	0,582
30	Tulis Unit 2	0,000	HEADRACE SYSTEM	0,582	POWER INTAKE	0,582	[ASSET] POWER INTAKE	0,582
31	Siteki	0,000	INSTRUMENTATION AND CONTROL SYSTEM	0,140	MAIN CONTROL PANELS	0,351	[ASSET] MAIN CONTROL PANELS	0,592
32	Siteki	0,000	DRAINAGE PUMP SYSTEM	0,400	DRAINAGE PUMP	0,400	[ASSET] SUMPWELL SYSTEM	0,592
33	Garung Unit 1	0,109	Generator System	0,537	EXCITER SET	0,604	[ASSET] Excitation System (Emerso)	0,604
34	Tulis Unit 2	0,000	ELECTRO HYDRAULIC OIL SYSTEM	0,355	ELECTRO HYDRAULIC OIL GOVERNOR CONTROL	0,532	[ASSET] PLC GOVERNOR	0,609
35	Lambur Unit 1	0,610	HEADRACE SYSTEM	0,610	POWER INTAKE	0,610	[ASSET] PENSTOCK	0,610
36	Lambur Unit 2	0,139	INSTRUMENTATION AND CONTROL SYSTEM U2	0,61	GENERATOR RELAY PROTECTION	0,61	[ASSET] PROTECTIONT EQUIPMENT UNIT CONTROL AND PROTECTION	0,61
37	Siteki	0,000	ELECTRO HYDRAULIC OIL SYSTEM	0,150	AC LUBRICATING OIL PUMP	0,427	[ASSET] GOVERNOR SUMPTANK, PUMPS AND PRESSURE TANK	0,632
38	Tulis Unit 2	0,000	LUBRICATING OIL SYSTEM	0,181	LUBRICATING EQUIPMENT	0,285	[ASSET] GUIDE VANE	0,641
39	Tulis Unit 2	0,000	TURBINE SYSTEM	0,427	TURBINE	0,447	[ASSET] GUIDE VANE	0,641
40	Plumbungan	0,000	LUBRICATING OIL SYSTEM	0,048	LUBRICATING EQUIPMENT	0,141	[ASSET] INLET VALVE ASSEMBLY	0,642
41	Plumbungan	0,000	TURBINE SYSTEM	0,363	ISOLATING VALVE	0,603	[ASSET] INLET VALVE ASSEMBLY	0,642
42	Kedungombo	0,002	Lubricating & Oil System	0,16	OIL PUMP, TANK, PIPING AND VALVE (FLUID SUPPLY)	0,298	[ASSET] GOVERNOR HYDRAULIK SYSTEM	0,6475
43	Ketenger Unit 3	0,159	TURBINE SYSTEM U3	0,486	TURBINE	0,548	[ASSET] GUIDE VANE	0,697
44	Tapen	0,000	INSTRUMENTATION AND CONTROL SYSTEM	0,212	CONTROL & PROTECTION EQUIPMENT	0,351	[ASSET] MODUL GOVERNOR	0,697
45	Ketenger Unit 2	0,278	GENERATOR SYSTEM U2	0,465	AUTOMATIC VOLTAGE REGULATOR (AVR) GENERATOR	0,698	[ASSET] EXCITATION & AVR CONTROL	0,706
46	Garung Unit 2	0,208	Generator System	0,635	EXCITER SET	0,715	[ASSET] Excitation System (Emerso)	0,715
47	Jelok Unit 1	0,163	System Transmition	0,463	Pipeline & Isolator phase busbar	0,616	[ASSET] PMT Kopel A (SCHNEIDER ELECTRIC)	0,717
48	Jelok Unit 2	0,085	System Transmition	0,463	Pipeline & Isolator phase busbar	0,616	[ASSET] PMT Kopel A (SCHNEIDER ELECTRIC)	0,717
49	Jelok Unit 3	0,061	System Transmition	0,463	Pipeline & Isolator phase busbar	0,616	[ASSET] PMT Kopel A (SCHNEIDER ELECTRIC)	0,717
50	Jelok Unit 4	0,144	System Transmition	0,463	Pipeline & Isolator phase busbar	0,616	[ASSET] PMT Kopel A (SCHNEIDER ELECTRIC)	0,717

No.	Nama PLTA	Nilai RBD Unit	System Nilai terkecil	Nilai RBD System	Sub System Nilai Terkecil	Nilai RBD Sub system	Asset Nilai Terkecil	Nilai RBD Asset
51	Plumbungan	0,000	ELECTRO HYDRAULIC OIL SYSTEM	0,341	AC LUBRICATING OIL PUMP	0,531	[ASSET] GOVERNOR SUMPTANK, PUMPS AND PRESSURE TANK	0,729
52	Plumbungan	0,000	GENERATOR TRANSFORMER	0,499	GENERATOR TRANSFORMER	0,603	[ASSET] MAIN TRANSFORMER TANK ASSY	0,729
53	Tapen	0,000	TURBINE SYSTEM	0,405	TURBINE	0,469	[ASSET] GUIDE VANE	0,749
54	Wadaslintang Unit 1	0,038	GENERATOR SYSTEM	0,411	AUTOMATIC VOLTAGE REGULATOR (AVR) GENERATOR	0,737	[ASSET] EXCITATION & AVR CONTROL	0,758
55	Timo Unit 1	0,206	LUBRICATING OIL SYSTEM	0,55	OIL PUMP, TANK, PIPING AND VALVE (FLUID SUPPLY)	0,555	[ASSET] GOVERNOR SUMP TANK, PUMPS AND PRESSURE TANK (GOVERNOR HYDRAULIC SYSTEM)	0,775
56	Plumbungan	0,000	INSTRUMENTATION AND CONTROL SYSTEM	0,340	CONTROL & PROTECTION EQUIPMENT	0,411	[ASSET] MEASURING DEVICE	0,775
57	Tulis Unit 2	0,000	TRANSFORMER	0,532	GENERATOR TRANSFORMER PROTECTION	0,667	[ASSET] TRANSFORMATOR PROTECTION	0,798
58	Timo Unit 3	0,260	GENERATOR TRANSFORMER	0,709	GENERATOR TRANSFORMER	0,756	[ASSET] MAIN TRANSFORMER (TRAFINDO)	0,819
59	Klambu	0,243	LUBRICATING OIL SYSTEM	0,612	LUBRICATING EQUIPMENT	0,713	[ASSET] POWER INTAKE	0,832
60	Ketenger Unit 1	0,294	GENERATOR SYSTEM U1	0,651	AUTOMATIC VOLTAGE REGULATOR (AVR) GENERATOR	0,841	[ASSET] EXCITATION & AVR CONTROL	0,841
61	Wonogiri Unit 2	0,461	GENERATOR SYSTEM U2	0,730	AUTOMATIC VOLTAGE REGULATOR (AVR) GENERATOR	0,865	[ASSET] EXCITATION DAN AVR CONTROL	0,886
62	Wadaslintang Unit 2	0,051	BALANCE OF PLANT	0,499	COOLING SYSTEM	0,557	[ASSET] GENERATOR AIR COOLER	0,895
63	Timo Unit 2	0,361	GENERATOR SYSTEM	0,775	ROTOR GENERATOR	0,895	[ASSET] GENERATOR AIR COOLER	0,909
64	Pejengkolan	0,272	GENERATOR SYSTEM	0,69	GENERATOR RELAY PROTECTION	0,884	[ASSET] MEASUREMENT AND CONTROL DEVICES	0,911
65	Wonogiri Unit 1	0,587	GENERATOR SYSTEM U1	0,844	ROTOR GENERATOR	0,930	[ASSET] GENERATOR AIR COOLER	0,953

Dalam evaluasi keandalan sistem, nilai *reliability* merepresentasikan *probabilitas* suatu komponen atau sistem dapat berfungsi dengan baik selama periode waktu tertentu tanpa mengalami kegagalan. Penetapan batas nilai *reliability* sangat bergantung pada tingkat kritikalitas fungsi sistem tersebut. Untuk sistem atau komponen yang bersifat non-kritis, nilai reliability sebesar 0,7 dapat diterima sebagai batas minimum, selama terdapat strategi mitigasi seperti sistem cadangan (*redundancy*), kemudahan penggantian, atau konsekuensi kegagalan yang rendah.

Menurut (Elsayed, 2012) sistem dengan *reliability* di bawah 0,8 cenderung dianggap tidak memadai untuk sistem utama, namun masih dapat diterapkan pada komponen pendukung. Hal ini diperkuat oleh (O'Connor & KLEYNER, 2011) yang menyatakan bahwa nilai reliability minimum ditentukan berdasarkan konsekuensi kegagalan dan biaya pemeliharaan. Oleh karena itu, pada studi ini, ditetapkan batas minimum nilai reliability sebesar 0,7 sebagai acuan evaluasi untuk komponen dengan risiko rendah terhadap keberlangsungan operasi sistem secara keseluruhan.

Untuk itu, dalam tugas akhir ini, komponen-komponen dengan nilai RBD di bawah 0,7 akan menjadi objek utama dalam analisis keandalan lanjutan menggunakan pendekatan *Weibull*. Analisis ini bertujuan untuk mengidentifikasi pola distribusi kegagalan, estimasi umur andal, serta

parameter bentuk (β) yang mencerminkan sifat kerusakan komponen, apakah bersifat awal, acak, atau aus.

Dengan pendekatan ini diharapkan dapat disusun rekomendasi teknis dalam bentuk tindakan perbaikan, penjadwalan ulang pemeliharaan, atau bahkan *redesign sistem* untuk meningkatkan keandalan dan efisiensi operasional pembangkit secara keseluruhan.

4.2.3 Perhitungan Parameter *Weibull*

Setelah data historis kegagalan dikompilasi dan dikonversi menjadi *format time to failure*, tahap selanjutnya adalah melakukan analisis distribusi kegagalan menggunakan metode *Weibull Analysis*. Tujuan dari tahap ini adalah untuk menentukan pola kegagalan komponen serta menghitung parameter-parameter keandalan yang dibutuhkan untuk perencanaan pemeliharaan.

Distribusi *Weibull* merupakan metode statistik yang umum digunakan dalam *reliability engineering* untuk memodelkan distribusi umur komponen atau sistem. Distribusi ini memiliki dua parameter utama, yaitu:

β (beta) – *Shape parameter*: menunjukkan pola kegagalan

$\beta < 1 \rightarrow$ *Infant mortality* (gagal awal)

$\beta = 1 \rightarrow$ *Random failure* (gagal acak, eksponensial)

$\beta > 1 \rightarrow$ *Wear-out failure* (gagal karena keausan)

η (eta) – *Scale parameter*: menyatakan waktu kegagalan karakteristik, yaitu waktu di mana 63,2% populasi komponen diperkirakan telah gagal.

Data yang digunakan adalah pasangan nilai *time to failure*, baik data yang mengalami kegagalan maupun data yang tersensor (belum gagal). penganalisis pola kegagalan komponen menggunakan distribusi *Weibull* untuk menghitung parameter β (*beta*) dan η (*eta*).

Hasil perhitungan RBD pada Tabel 4.7 menunjukkan bahwa terdapat 44 aset dengan nilai *reliability* di bawah 0,7, yang selanjutnya menjadi fokus utama untuk dianalisis lebih lanjut menggunakan pendekatan *Weibull Analysis.*

Langkah pertama yang dilakukan dalam proses ini adalah pengambilan data historis dari sistem ERP *Maximo* untuk masing-masing aset, khususnya data terkait waktu mulai gangguan dan waktu selesai gangguan. Data tersebut digunakan untuk menghitung durasi gangguan serta waktu antar gangguan (T*ime Between Failures*), yang menjadi dasar dalam analisis distribusi kegagalan dan estimasi keandalan menggunakan metode *Weibull*.

Tabel 4. 8 : Data Failur Asset Guide Vane Ketenger Unit 3 pada Maximo

SITE MRC
ASSETNUM KG03MEA10AA100-001
DESCRIPTION [ASSET] GUIDE VANE

WONUM	WORK TYPE	REPORT DATE	ACTUAL START	START GANGGUAN	FINISH GANGGUAN	JAM GANGGUAN	JAM ANTAR GANGGUAN
201712413	EM	Feb 25, 2017, 12.17 AM	Feb 25, 2017, 12.10 AM	Feb 25, 2017, 12.17 AM	Mar 2, 2017, 8.01 AM	128	151752
201810242	EM	Jan 5, 2018, 10.44 AM	Jan 5, 2018, 10.44 AM	Jan 5, 2018, 10.44 AM	Jan 9, 2018, 8.42 AM	94	7418
201815163	EM	May 24, 2018, 8.35 PM	May 24, 2018, 5.25 PM	May 24, 2018, 8.35 PM	May 27, 2018, 8.15 AM	60	3251
201817441	EM	Aug 4, 2018, 10.45 AM	Aug 4, 2018, 12.21 PM	Aug 4, 2018, 10.45 AM	Aug 7, 2018, 11.55 AM	74	1658
201821621	EM	Dec 4, 2018, 1.44 PM	Dec 4, 2018, 5.51 AM	Dec 4, 2018, 1.44 PM	May 23, 2019, 7.54 AM	4075	2857
202117844	EM	Jul 7, 2021, 4.28 PM	Jul 7, 2021, 10.15 AM	Jul 7, 2021, 4.28 PM	Jul 8, 2021, 8.23 AM	16	18632
202320412	EM	Nov 24, 2023, 8.36 PM	Nov 24, 2023, 7.45 PM	Nov 24, 2023, 8.36 PM	Nov 29, 2023, 10.15 AM	110	20868
202416156	EM	Apr 29, 2024, 12.58 PM	Apr 29, 2024, 9.00 AM	Apr 29, 2024, 12.58 PM	May 7, 2024, 8.10 AM	188	3650
202418910	EM	Jun 23, 2024, 1.24 PM	Jun 23, 2024, 2.45 AM	Jun 23, 2024, 1.24 PM	Jun 27, 2024, 8.11 AM	91	1133

Analisis *Weibull* digunakan untuk mengetahui pola kegagalan dari suatu peralatan atau sistem dengan menghitung dua parameter utama, yaitu β (*beta*) dan η (*eta*). Berdasarkan data waktu kegagalan sebanyak 9 titik data, dilakukan proses estimasi distribusi *Weibull*, menggunakan transformasi data secara logaritmik.

Langkah-Langkah Perhitungan:

1) Urutkan data waktu kegagalan (x) secara *ascending*.
2) Hitung fungsi distribusi kumulatif *Weibull* empiris untuk setiap urutan ke-i dengan rumus:

$$F(t) = \frac{i - 0{,}3}{n - 0{,}4}$$

Dimana :

- i = Urutan data (1, 2, .., 9)
- n = total jumlah data (9)

3) Lakukan transformasi data ke bentuk *linier*:

- Sumbu-X

$$X = \mathrm{Ln}\left(Ln\left(\frac{1}{1-F(t)}\right)\right)$$

- Sumbu-Y

$$Y = Ln(x)$$

Transformasi ini bertujuan untuk memetakan data ke dalam bentuk persamaan garis lurus:

$$Y = \beta \times + Ln(\eta)$$

4) Hitung nilai *slope* (β) dan *intercept* (ln η) dari persamaan *regresi linier* antara X dan Y.

Berdasarkan hasil perhitungan (tabel 4.9) regresi:

β (*shape parameter*) = 0,795

η (*scale parameter*) = 12895,02

Koefisien determinasi (R^2) = 0,819, menunjukkan kecocokan model yang sangat baik.

Tabel 4. 9 : Perhitungan Weilbull Guide Vane Ketenger unit 3

Data	n	Estimate Weibull Plot		XY-regression	
		MTBF	y-plot	X	Y
i	n	x	F(t) = (i - 0.30)/(n - 0.4)	X = ln(ln(1/1 - F(t)))	ln(x)
1	9	1133,00	0,074468085	-2,558940818	7,0326243
2	9	1658,00	0,180851064	-1,611994375	7,4133673
3	9	2857,00	0,287234043	-1,082929422	7,9575274
4	9	3251,00	0,393617021	-0,69266027	8,0867179
5	9	3650,00	0,5	-0,366512921	8,2024824
6	9	7418,00	0,606382979	-0,070018179	8,9116648
7	9	18632,00	0,712765957	0,221107814	9,8326358
8	9	20868,00	0,819148936	0,536540994	9,9459722
9	9	151752,00	0,925531915	0,954505028	11,930003

Regression Stats	
Standart Weibull	
β =	0,7959443
η =	12895,027
R^2	0,8192251

Terdapat satu nilai data ekstrem sebesar 151.752 yang secara signifikan berbeda dari data lainnya. Nilai ini berpotensi memengaruhi

hasil regresi dan menyebabkan estimasi parameter menjadi kurang stabil. Nilai tersebut diperoleh dari selisih antara *installation date* dan waktu gangguan pertama yang tercatat dalam sistem ERP *Maximo*. Namun perlu dicatat bahwa sistem Maximo baru mulai diterapkan pada tahun 2011, sehingga data gangguan sebelumnya kemungkinan tidak tercatat secara konsisten kecuali pembangkit yang *instalation date* diatas tahun 2011.

Oleh karena itu, data ekstrem tersebut dikeluarkan dari analisis untuk menjaga akurasi dan kestabilan model. Setelah dilakukan evaluasi ulang, diperoleh hasil estimasi parameter *Weibull* sebagai berikut (Tabel 4.10):

β (*shape parameter*) = 1,089

η (*scale parameter*) = 7294,779

Koefisien determinasi (R^2) = 0,894, menunjukkan kecocokan model yang sangat baik.

Tabel 4. 10 : Perhitungan Ulang *Weilbull Guide Vane* Ketenger unit 3

Data	n	Estimate Weibull Plot		XY-regression		Regression Stats	
		MTBF	y-plot	X	Y	Standart Weibull	
i	n	x	F(t) = (i - 0.30)/(n - 0.4)	X = ln(ln(1/1 - F(t)))	ln(x)	β =	1,089032
1	8	1133,00	0,083333333	-2,441716399	7,032624261	η =	7294,779
2	8	1658,00	0,202380952	-1,486670964	7,413367336	R^2	0,894381
3	8	2857,00	0,321428571	-0,947354424	7,957527402		
4	8	3251,00	0,44047619	-0,543574052	8,08671792		
5	8	3650,00	0,55952381	-0,198574256	8,202482447		
6	8	7418,00	0,678571429	0,12661497	8,911664758		
7	8	18632,00	0,797619048	0,468504666	9,832635812		
8	8	20868,00	0,916666667	0,910235093	9,945972164		

Kesimpulan dari hasil evaluasi *weibull analysis* adalah :

- Nilai β > 1 menunjukkan bahwa pola kegagalan mulai memasuki *fase wear-out*, di mana probabilitas kegagalan meningkat seiring bertambahnya umur pakai komponen.
- Nilai η = 7.294 jam (~304 hari) menggambarkan bahwa 63,2% dari populasi komponen serupa diperkirakan akan gagal setelah digunakan selama kurang lebih 10 bulan operasi.

- Koefisien determinasi $R^2 = 0{,}894$ menunjukkan bahwa model regresi *Weibull* memiliki kecocokan yang sangat baik terhadap data aktual, sehingga hasil perhitungannya layak digunakan sebagai dasar perencanaan pemeliharaan.

Evaluasi *Weibull Analysis* (Lampir 35 s/d 63) dilakukan terhadap 44 (empat puluh empat) aset. Namun, terdapat beberapa aset yang merupakan *common asset*, yaitu peralatan yang digunakan secara bersama oleh beberapa unit pembangkit. Setelah dilakukan penyisihan terhadap aset yang tergolong sama atau tumpang tindih, jumlah asset unik yang dievaluasi menjadi 30 (tiga puluh) asset.

Selain itu, terdapat 1 (satu) aset yang tidak dapat dianalisis menggunakan metode *Weibull* karena hanya memiliki 1 (satu) kali data gangguan sepanjang periode observasi. Kondisi ini tidak memenuhi syarat minimum data untuk estimasi distribusi kegagalan.

Tabel 4. 11 : Hasil *Weibull Analysis* 44 *Asset*

No.	Nama PLTA	Asset Nilai Terkecil	Nilai RBD Asset	Hasil Weibull Analysis	
				β (beta) Shape	η (eta)
1	Tapen	[ASSET] JTM 20 KV	0,069	0,609	621,895
2	Sempor	[ASSET] Feeder Express 20 KV GB3	0,079	0,66	381,54
3	PB. Soedirman Unit 1	[ASSET] POWER INTAKE GATE	0,162	0,408	468,424
4	PB. Soedirman Unit 2	[ASSET] POWER INTAKE GATE	0,162	0,408	468,424
5	PB. Soedirman Unit 3	[ASSET] POWER INTAKE GATE	0,162	0,408	468,424
6	Siteki	[ASSET] CIRCUIT BREAKER	0,170	0,679	899,884
7	Plumbungan	[ASSET] EXCITATION & AVR CONTROL	0,205	0,678	2875,888
8	Ketenger Unit 4	[ASSET] GOVERNOR SUMPTANK, PUMP & PRESSURE TANK	0,217	0,504	2937,126
9	Tulis Unit 2	[ASSET] COOLING WATER STRAINER	0,253	0,537	2589,955
10	Tulis Unit 1	[ASSET] COOLING WATER STRAINER	0,258	0,537	2589,955
11	Tulis Unit 1	[ASSET] COOLING WATER STRAINER	0,258	0,537	2589,955
12	Tulis Unit 2	[ASSET] COOLING WATER STRAINER	0,258	0,537	2589,955
13	Siteki	[ASSET] GUIDE VANE	0,288	0,797	4400,973
14	Siteki	[ASSET] GUIDE VANE	0,288	0,797	4400,973
15	Tulis Unit 1	[ASSET] TRHUST BEARING GENERATOR	0,296	0,437	1346,666
16	Siteki	[ASSET] EXCITATION & AVR CONTROL	0,328	0,523	2884,173
17	Tapen	[ASSET] BEARING LUBRICATION	0,350	0,638	1482,848
18	Tapen	[ASSET] BEARING LUBRICATION	0,350	0,638	1482,848
19	Tapen	[ASSET] BEARING LUBRICATION	0,350	0,638	1482,848
20	Siteki	[ASSET] POWER INTAKE	0,387	0,387	293,319
21	Siteki	[ASSET] POWER INTAKE	0,351	0,387	293,319
22	Sidorejo	[ASSET] POWER INTAKE	0,382	0,584	7,608
23	Tulis Unit 1	[ASSET] PLC GOVERNOR	0,404	0,534	1494,131

No.	Nama PLTA	Asset Nilai Terkecil	Nilai RBD Asset	Hasil Weibull Analysis	
				ß (beta) Shape	η (eta)
24	Tulis Unit 1	[ASSET] PLC GOVERNOR	0,404	0,534	1494,131
25	Tulis Unit 1	[ASSET] GUIDE VANE	0,509	0,700	4837,194
26	Tulis Unit 1	[ASSET] GUIDE VANE	0,509	0,700	4837,194
27	Tulis Unit 2	[ASSET] TRHUST BEARING GENERATOR	0,509	0,874	4214,829
28	Plumbungan	[ASSET] COOLING WATER PUMP	0,531	0,601	7990,308
29	Tulis Unit 1	[ASSET] POWER INTAKE	0,582	0,251	506,048
30	Tulis Unit 2	[ASSET] POWER INTAKE	0,582	0,251	506,048
31	Siteki	[ASSET] MAIN CONTROL PANELS	0,592	1,408	15938,848
32	Siteki	[ASSET] SUMPWELL SYSTEM	0,592	0,725	15501,618
33	Garung Unit 1	[ASSET] Excitation System (Emerso)	0,604	2,049	26855,794
34	Tulis Unit 2	[ASSET] PLC GOVERNOR	0,609	0,647	7814,424
35	Lambur Unit 1	[ASSET] PENSTOCK	0,610		
36	Lambur Unit 2	[ASSET] PROTECTIONT EQUIPMENT UNIT CONTROL AND PROTE	0,61	0,648	11991,994
37	Siteki	[ASSET] GOVERNOR SUMPTANK, PUMPS AND PRESSURE TANK	0,632	0,255	13401,923
38	Tulis Unit 2	[ASSET] GUIDE VANE	0,641	0,578	4086,694
39	Tulis Unit 2	[ASSET] GUIDE VANE	0,641	0,578	4086,694
40	Plumbungan	[ASSET] INLET VALVE ASSEMBLY	0,642	0,594	13871,080
41	Plumbungan	[ASSET] INLET VALVE ASSEMBLY	0,642	0,594	13871,080
42	Kedungombo	[ASSET] GOVERNOR HYDRAULIK SYSTEM	0,6475	0,619	6709,458
43	Ketenger Unit 3	[ASSET] GUIDE VANE	0,697	1,089	7294,779
44	Tapen	[ASSET] MODUL GOVERNOR	0,697	0,455	3345,007

Hasil perhitungan *Weibull Analysis* untuk masing-masing aset menunjukkan variasi nilai parameter β (*beta*) dan η (*eta*) yang mencerminkan karakteristik kegagalan komponen secara individu. Data ini diperoleh dari evaluasi historis *time-to-failure* pada sistem pembangkit, dengan tujuan untuk memprediksi pola keandalan dan menyusun strategi pemeliharaan yang lebih presisi.

Aset-aset dengan nilai $\beta < 1$ sebanyak 27 (Dua puluh tujuh) mengindikasikan pola *infant mortality*, di mana kegagalan cenderung terjadi pada fase awal umur operasional. Hal ini menunjukkan potensi masalah pada tahap instalasi, kualitas komponen, atau kondisi *commissioning*. Ada 1 (satu) Aset dengan β mendekati 1 menunjukkan kegagalan acak (*random failure*), di mana kerusakan tidak terprediksi oleh waktu operasi. Dan 2 (dua) aset dengan $\beta > 1$ mengalami pola *wear-out*, di mana probabilitas kegagalan meningkat seiring umur operasi. Komponen-komponen ini umumnya berada pada fase akhir masa pakai dan perlu mendapat perhatian lebih.

4.2.4 Evaluasi *System and Equipment Criticality* (SCR dan ECR)

Evaluasi kritikalitas sistem dan peralatan (*System and Equipment Criticality*) merupakan tahapan penting dalam proses pengolahan data untuk mengidentifikasi sistem atau aset yang paling berdampak terhadap keberlangsungan operasi pembangkit. Evaluasi ini dilakukan menggunakan dua pendekatan utama, yaitu:

- *System Criticality Ranking* (SCR)
- *Equipment Criticality Ranking* (ECR)

Masing-masing metode memiliki parameter penilaian yang berbeda, namun saling melengkapi dalam menilai seberapa penting dan mendesaknya suatu sistem atau komponen untuk dipelihara secara prioritas.

A. Evaluasi *System Criticality Ranking* (SCR)

SCR dilakukan dengan memberikan skor pada sistem berdasarkan empat parameter utama:

- ✓ *Safety* (S): potensi bahaya terhadap personel bila sistem gagal.
- ✓ *Environmental (E):* dampak sistem terhadap lingkungan.
- ✓ *Cost (C):* potensi kerugian finansial akibat kegagalan sistem.
- ✓ *Commercial Availability (CA):* pengaruh terhadap ketersediaan daya yang dapat dijual.

Parameter *Efficiency* (EFF) tidak digunakan dalam konteks PLTA, karena sistem ini umumnya memiliki efisiensi tinggi dan konstan, serta sulit diukur secara spesifik pada *level* sistem.

Hasil evaluasi SCR menunjukkan bahwa sistem-sistem seperti:

- MK (*Generator Plant*),
- ME (*Hydraulic Turbine Plant*),
- CH (*Protection System*)

memiliki tingkat kritikalitas tertinggi karena berpengaruh langsung terhadap aspek *safety* dan *availability* pembangkitan. Hasil SCR

perhitungan dapat dilihat pada lampiran 64 sampai lampiran 105 untuk setiap unit pembangkit di UBP Mrica.

B. Evaluasi *Equipment Criticality Ranking* (ECR)

ECR digunakan untuk menilai tingkat kritikalitas masing-masing komponen atau peralatan berdasarkan dampak kegagalan terhadap sistem. Parameter yang digunakan dalam evaluasi ECR meliputi:

- ✓ Durasi *downtime* akibat kegagalan peralatan,
- ✓ Tingkat risiko terhadap keselamatan,
- ✓ Dampak kegagalan terhadap performa sistem secara keseluruhan.

Komponen dengan nilai ECR tinggi antara lain:

- *Excitation & AVR Control System* (ECR > 5,0),
- *Generator Protection System*,
- *Governor Pump and Valve Set*.

Sementara itu, peralatan pendukung seperti *Annunciation Panel* atau *Lighting Panel* memiliki nilai ECR rendah karena dampaknya lebih bersifat informatif dan tidak langsung terhadap kontinuitas operasi pembangkitan. Hasil ECR perhitungan dapat dilihat pada lampiran 64 sampai lampiran 105 setiap unit pembangkit di UBP Mrica.

4.2.5 Perhitungan Asset Criticality Ranking (ACR)

Setelah dilakukan evaluasi terhadap sistem dan peralatan melalui pendekatan *System Criticality Ranking* (SCR) dan *Equipment Criticality Ranking* (ECR), tahap selanjutnya adalah *menyusun Asset Criticality Ranking* (ACR) untuk setiap aset pembangkit. ACR merupakan metode integratif yang digunakan untuk menilai tingkat kekritisan suatu peralatan berdasarkan kombinasi antara dampak operasional dan tingkat keandalannya detail perhitungan masing-masing aset dapat dilihat pada lampiran 106 sampai dengan 149.

Perhitungan ACR, sebagaimana dijelaskan pada Rumus No. 6, dilakukan dengan cara mengalikan nilai SCR dengan nilai ECR untuk masing-masing aset:

$$ACR=SCR\times ECR$$

Aset dengan nilai ACR tertinggi diklasifikasikan dalam kelompok Top 10% hingga Top 30% dari seluruh peralatan yang dianalisis, dan dikategorikan sebagai peralatan prioritas tinggi. Artinya, kegagalan pada aset-aset ini berpotensi menimbulkan:

- Kehilangan produksi daya secara signifikan,
- Dampak terhadap keselamatan personel atau kerusakan peralatan lainnya,
- Biaya perbaikan atau pemulihan yang tinggi,
- Risiko *extended outage* atau *downtime* yang berkepanjangan.

Sebaliknya, aset dengan nilai ACR rendah umumnya merupakan peralatan pendukung, memiliki histori keandalan yang baik, atau tidak memiliki dampak langsung terhadap kontinuitas operasi utama pembangkitan.

Sebagai contoh, pada PLTA PB. Soedirman Unit 1 (Tabel 4.12), dari total 42 (empat puluh dua) aset yang dianalisis, ditemukan:

- ✓ 4 (empat) aset termasuk dalam kategori Top 10% *Critical Assets*, dan
- ✓ 11 (sebelas) aset masuk dalam kategori Top 30% *Critical Assets*.

Aset-aset ini perlu menjadi perhatian utama dalam penyusunan strategi pemeliharaan dan alokasi anggaran investasi pembangkitan.

Tabel 4. 12 : ACR Rank PLTA PB. Soeditman Unit 1

KKS Number	Deskripsi	SC	EC	ACR	ACR Rank	% ACR
PB01MKA10HA100-001	[ASSET] STATOR	7.53	6.54	49.26	1	3.3%
PB01MKA10HB100-001	[ASSET] ROTOR	7.53	6.54	49.26	1	3.3%
PB01BAT10GT100-002	[ASSET] MAIN TRANSFORMER (ELSEWEDY)	7.40	6.40	47.38	2	6.7%
PB01MEA10HB100-001	[ASSET] TURBINE SHAFT & RUNNER	6.86	6.91	47.37	3	10.0%
PB01MEB10AA200-001	[ASSET] INLET VALVE	6.86	6.22	42.68	4	13.3%
PB01MKC10GJ100-001	[ASSET] EXCITATION & AVR CONTROL	7.53	5.55	41.77	5	16.7%
PB01BAC10GS100-002	[ASSET] GENERATOR CIRCUIT BREAKER SF6 (ABB)	7.40	5.55	41.03	6	20.0%
PB01MKC10GU100-001	[ASSET] THYRISTOR SET	7.53	5.39	40.57	7	23.3%
PB01MKC10GT100-002	[ASSET] EXCITATION TRANSFORMER (ABB)	7.53	5.39	40.57	7	23.3%
PB01MEY10GH100-002	[ASSET] PLC GOVERNOR SYSTEM (ANDRITZ)	6.86	5.92	40.56	8	26.7%
PB01MEX10AA100-001	[ASSET] GOVERNOR ACTUATOR, MAIN CONTROL SYSTEM	6.86	5.92	40.56	8	26.7%
PB01MKD10HD100-001	[ASSET] GUIDE BEARING GENERATOR	7.53	5.00	37.67	9	30.0%
PB01MKD10HD200-001	[ASSET] THRUST BEARING GENERATOR	7.53	5.00	37.67	9	30.0%

4.2.6 Penentuan *Maintenance Priority Index* (MPI)

Maintenance Priority Index (MPI) merupakan tahapan akhir dalam proses evaluasi keandalan dan kritikalitas aset. Tujuan utama dari penilaian ini adalah untuk menentukan tingkat urgensi pemeliharaan dan kebutuhan intervensi teknis terhadap peralatan pembangkit, berdasarkan kombinasi antara dampak kritikalitas dan kondisi aktual peralatan.

Perhitungan MPI, sebagaimana dijelaskan pada Rumus No. 4, dilakukan dengan mengalikan nilai *Asset Criticality Ranking* (ACR) dengan *Asset Failure Probability Factor* (AFPF) pada masing-masing aset, yang dirumuskan sebagai berikut:

$$MPI = (SCR \times ECR) \times AFPF = ACR \times AFPF$$

Nilai AFPF sendiri dihitung sebagai *Root Mean Square* (RMS) dari *Condition Status* (CS) dan *Repair Status* (RS), nilai CS dan RS dilihat pada tabel 4.13 dengan rumus sebagai berikut:

$$AFPF = \sqrt{CS^2 + RS^2} \qquad (17)$$

Dengan:

- CS (*Condition Status*): indikator kondisi teknis aset berdasarkan hasil inspeksi,
- RS (*Repair Status*): tingkat kesulitan atau frekuensi perbaikan terhadap aset yang bersangkutan.

Aset dengan nilai MPI tertinggi diklasifikasikan dalam kelompok *Top* 10% hingga *Top* 30% dari seluruh aset yang dianalisis dan dikategorikan sebagai peralatan dengan prioritas pemeliharaan tertinggi. Aset dalam kategori ini memerlukan perhatian khusus, baik dalam bentuk peningkatan frekuensi inspeksi, penggantian *preventif*, maupun alokasi anggaran pemeliharaan.

Secara umum, nilai MPI tertinggi cenderung sejalan dengan nilai ACR tertinggi (tabel 4.14), karena aset-aset tersebut tidak hanya bersifat kritis

terhadap operasi, tetapi juga menunjukkan kondisi fisik yang mulai menurun atau riwayat kerusakan yang signifikan.

Tabel 4. 13 : Skor *Condition Status* dan *Repair Status*

CS : Condition Status	Skor	RS : Repair Status	Skor
Hijau	1	Jumlah Gangguan 0-3 kali dalam 10 tahun	1
Kuning	2	Jumlah Gangguan 4-6 kali dalam 10 tahun	2
Merah	3	Jumlah Gangguan 7-10 kali dalam 10 tahun	3

Tabel 4. 14 : ACR MPI Rank PLTA Gunung Wugul Common

KKS Number	Deskripsi	SCR	ACR	RMS	MPI	ACR Rank	%
GW00LPC10BR100-001	[ASSET] PENSTOCK	6.38	57.98	1.41	82.00	1	3.70%
GW00LPC20BF100-001	[ASSET] SALURAN UTAMA	6.38	55.01	1.41	77.79	2	7.41%
GW00LPC10BF100-001	[ASSET] SANDTRAP	6.38	48.62	1.41	68.75	3	11.11%
GW00LPC20BF200-001	[ASSET] HEADPOND	6.38	47.34	1.41	66.95	4	14.81%
GW00BFT10GT100-001	[ASSET] AUXILLIARY TRANSFORMER	5.89	45.38	1.41	64.17	5	18.52%
GW00LNA10BF100-001	[ASSET] BENDUNG	7.11	45.22	1.41	63.96	6	22.22%
GW00AJB10GS100-001	[ASSET] CIRCUIT BREAKER INCOMING 20 KV COMPARTMENT	6.82	42.72	1.41	60.42	7	25.93%
GW00ANK10GS100-001	[ASSET] 110 VDC SYSTEM	6.08	35.99	1.41	50.89	8	29.63%
GW00LNA10BF200-001	[ASSET] TAILRACE	7.11	35.89	1.41	50.75	9	33.33%
GW00AJA10GA100-001	[ASSET] JTM 20 KV	6.82	34.43	3.16	108.89	10	37.04%
GW00AJB10GS200-001	[ASSET] CIRCUIT BREAKER AUXILLIARY TRANSFORMER COMPARTMENT	6.82	32.88	1.41	46.50	11	40.74%
GW00BFT10GS100-001	[ASSET] MAIN AC DISTRIBUCION PANEL	5.89	32.02	1.41	45.28	12	44.44%
GW00CWF10GJ100-001	[ASSET] COMMON CONTROL AND PROTECTION SYSTEM	6.12	30.47	1.41	43.08	13	48.15%
GW00CWA10GK100-001	[ASSET] HMI CONTROL ROOM	6.12	27.89	1.41	39.45	14	51.85%
GW00AJC10GS100-001	[ASSET] MEASUREMENT AND PROTECTION INCOMING 20 KV COMPARTMENT	6.82	25.05	1.41	35.43	15	55.56%
GW00AJC10GS200-001	[ASSET] MEASUREMENT AND PROTECTION AUXILLIARY TRANSFORMER COMPARTMENT	6.82	25.05	1.41	35.43	15	55.56%
GW00SMA10AE100-001	[ASSET] OVER HEAD CRANE 20 TON	4.12	19.12	1.41	27.04	16	59.26%
GW00UMC10BF100-001	[ASSET] POWER HOUSE BUILDING	3.32	17.86	1.41	25.26	17	62.96%
GW00LSL10BR100-001	[ASSET] DRAINAGE SYSTEM	5.36	11.99	1.41	16.96	18	66.67%
GW00SGA10BB100-001	[ASSET] APAR	3.71	11.12	1.41	15.73	19	70.37%
GW00XJA10AG100-001	[ASSET] EMERGENCY DIESEL GENERATOR SET	2.65	8.26	1.41	11.68	20	74.07%
GW00UZA10BF100-001	[ASSET] TANAH AREA GUNUNG WUGUL	1.73	5.74	1.41	8.12	21	77.78%
GW00CYP10GK100-001	[ASSET] CCTV	2.24	4.33	1.41	6.12	22	81.48%
GW00UZA10BF400-001	[ASSET] JALAN PLTA GUNUNG WUGUL	1.73	3.87	1.41	5.48	23	85.19%
GW00UYC10BF100-001	[ASSET] OFFICE BUILDING	1.73	3.35	1.41	4.74	24	88.89%
GW00UZA10BF300-001	[ASSET] LAHAN AREA PARKIR	1.73	3.00	1.41	4.24	25	92.59%
GW00UYC10BF200-001	[ASSET] GUDANG	1.73	3.00	1.41	4.24	25	92.59%
GW00UYF10BF100-001	[ASSET] POS SECURITY BENDUNG	1.73	3.00	1.41	4.24	25	92.59%
GW00UYF10BF200-001	[ASSET] POS SECURITY PH	1.73	3.00	1.41	4.24	25	92.59%
GW00CYA10GK100-001	[ASSET] RADIO KOMUNIKASI	2.24	2.24	1.41	3.16	26	96.30%
GW00UZA10BF200-001	[ASSET] HALAMAN PLTA GUNUNG WUGUL	1.73	1.73	1.41	2.45	27	100.00%

4.3 Analisa dan Interpretasi

Subbab ini membahas hasil pengolahan data yang telah dilakukan pada tahapan sebelumnya, meliputi analisa reliabilitas sistem menggunakan metode *Reliability Block Diagram* (RBD), analisa distribusi kegagalan dengan *Weibull Analysis*, serta evaluasi kritikalitas dan prioritas pemeliharaan aset melalui metode ACR (*Asset Criticality Ranking*) dan MPI (*Maintenance Priority Index*). Analisa ini bertujuan untuk menghasilkan pemahaman komprehensif mengenai kondisi keandalan aset pembangkit serta menyusun prioritas strategis dalam pengelolaan operasi dan pemeliharaan.

Tabel 4. 15 : Hasil Pengolahan Data Aset-aset Masuk Kriteria Prioritas

	Nama PLTA	Asset Nilai Terkecil	Nilai RBD Asset	β (beta) Shape	η (eta)	Betas Shape category	ACR Rank	MPI	Masuk kriteria prioritas?
1	Tapen	[ASSET] JTM 20 KV	0,069	0,609	621,895	Infant mortality	11,36%	147,046	Iya
2	Sempor	[ASSET] Feeder Express 20 KV GB3	0,079	0,66	381,54	Infant mortality	8,89%	134,397	Iya
3	PB. Soedirman Unit 1	[ASSET] POWER INTAKE	0,162	0,408	468,424	Infant mortality	8,33%	170,992	Iya
4	PB. Soedirman Unit 2	[ASSET] POWER INTAKE	0,162	0,408	468,424	Infant mortality	8,33%	170,992	Iya
5	PB. Soedirman Unit 3	[ASSET] POWER INTAKE	0,162	0,408	468,424	Infant mortality	8,33%	170,992	Iya
6	Siteki	[ASSET] CIRCUIT BREAKER	0,170	0,679	899,884	Infant mortality	24,00%	125,842	Iya
7	Plumbungan	[ASSET] EXCITATION & AVR CONTROL	0,205	0,678	2875,888	Infant mortality	14,00%	136,848	Iya
8	Ketenger Unit 4	[ASSET] GOVERNOR SUMPTANK, PUMP & PRESSURE TANK	0,217	0,504	2937,126	Infant mortality	58,97%	79,640	tidak
9	Tulis Unit 2	[ASSET] COOLING WATER STRAINER	0,253	0,537	2589,955	Infant mortality	94,12%	35,125	tidak
10	Tulis Unit 1	[ASSET] COOLING WATER STRAINER	0,258	0,537	2589,955	Infant mortality	91,18%	35,125	tidak
11	Tulis Unit 1	[ASSET] COOLING WATER STRAINER	0,258	0,537	2589,955	Infant mortality	91,18%	35,125	tidak
12	Tulis Unit 2	[ASSET] COOLING WATER STRAINER	0,258	0,537	2589,955	Infant mortality	94,12%	35,125	tidak
13	Siteki	[ASSET] GUIDE VANE	0,288	0,797	4400,973	Infant mortality	54,00%	98,362	tidak
14	Siteki	[ASSET] GUIDE VANE	0,288	0,797	4400,973	Infant mortality	54,00%	98,362	tidak
15	Tulis Unit 1	[ASSET] TRHUST BEARING GENERATOR	0,296	0,437	1346,666	Infant mortality	32,35%	132,369	tidak
16	Siteki	[ASSET] EXCITATION & AVR CONTROL	0,328	0,523	2884,173	Infant mortality	14,00%	136,848	Iya
17	Tapen	[ASSET] BEARING LUBRICATION	0,350	0,638	1482,848	Infant mortality	38,64%	125,943	tidak
18	Tapen	[ASSET] BEARING LUBRICATION	0,350	0,638	1482,848	Infant mortality	38,64%	125,943	tidak
19	Tapen	[ASSET] BEARING LUBRICATION	0,350	0,638	1482,848	Infant mortality	38,64%	125,943	tidak
20	Siteki	[ASSET] POWER INTAKE	0,387	0,387	293,319	Infant mortality	4,00%	159,908	Iya
21	Siteki	[ASSET] POWER INTAKE	0,351	0,387	293,319	Infant mortality	4,00%	159,908	Iya
22	Sidorejo	[ASSET] POWER INTAKE	0,382	0,614	206,216	Infant mortality	3,23%	159,91	Iya
23	Tulis Unit 1	[ASSET] PLC GOVERNOR	0,404	0,534	1494,131	Infant mortality	23,53%	122,678	Iya
24	Tulis Unit 1	[ASSET] PLC GOVERNOR	0,404	0,534	1494,131	Infant mortality	23,53%	122,678	Iya
25	Tulis Unit 1	[ASSET] GUIDE VANE	0,509	0,700	4837,194	Infant mortality	47,06%	107,250	tidak
26	Tulis Unit 1	[ASSET] GUIDE VANE	0,509	0,700	4837,194	Infant mortality	47,06%	107,250	tidak
27	Tulis Unit 2	[ASSET] TRHUST BEARING GENERATOR	0,509	0,874	4214,829	Infant mortality	32,35%	132,369	tidak
28	Plumbungan	[ASSET] COOLING WATER PUMP	0,531	0,601	7990,308	Infant mortality	74,00%	71,239	tidak
29	Tulis Unit 1	[ASSET] POWER INTAKE	0,582	0,251	506,048	Infant mortality	5,13%	159,908	Iya
30	Tulis Unit 2	[ASSET] POWER INTAKE	0,582	0,251	506,048	Infant mortality	5,13%	159,908	Iya
31	Siteki	[ASSET] MAIN CONTROL PANELS	0,592	1,408	15938,848	Wear-out failur	28,00%	139,479	Iya
32	Siteki	[ASSET] SUMPWELL SYSTEM	0,592	0,725	15501,618	Infant mortality	92,00%	22,872	tidak
33	Garung Unit 1	[ASSET] Excitation System (Emerso)	0,604	2,049	26855,794	Wear-out failur	7,68%	61,200	Iya
34	Tulis Unit 2	[ASSET] PLC GOVERNOR	0,609	0,647	7814,424	Infant mortality	23,53%	122,678	Iya
35	Lambur Unit 1	[ASSET] PENSTOCK	0,610			Infant mortality	5,88%	81,998	Iya
36	Lambur Unit 2	[ASSET] PROTECTIONT EQUIPMENT UNIT CONTROL AND PROTECTION SYSTEM	0,61	0,648	11991,994	Infant mortality	66,67%	38,602	tidak
37	Siteki	[ASSET] GOVERNOR SUMPTANK, PUMPS AND PRESSURE TANK	0,632	0,255	13401,923	Infant mortality	64,00%	56,314	tidak
38	Tulis Unit 2	[ASSET] GUIDE VANE	0,641	0,578	4086,694	Infant mortality	47,06%	107,250	tidak
39	Tulis Unit 2	[ASSET] GUIDE VANE	0,641	0,578	4086,694	Infant mortality	47,06%	107,250	tidak
40	Plumbungan	[ASSET] INLET VALVE ASSEMBLY	0,642	0,594	13871,080	Infant mortality	18,00%	129,083	Iya
41	Plumbungan	[ASSET] INLET VALVE ASSEMBLY	0,642	0,594	13871,080	Infant mortality	18,00%	129,083	Iya
42	Kedungombo	[ASSET] GOVERNOR HYDRAULIK SYSTEM	0,6475	0,619	6709,458	Infant mortality	27,08%	122,283	Iya
43	Ketenger Unit 3	[ASSET] GUIDE VANE	0,697	1,089	7294,779	Random failure	57,14%	103,682	tidak
44	Tapen	[ASSET] MODUL GOVERNOR	0,697	0,455	3345,007	Infant mortality	36,36%	131,640	tidak

Analisis prioritas terhadap aset-aset dilakukan berdasarkan hasil evaluasi nilai reliabilitas (RBD) terhadap 44 (empat puluh empat) aset (Tabel 4.15) dari berbagai unit PLTA. Aset yang memiliki nilai RBD di bawah 0,7 dianggap memiliki tingkat keandalan rendah dan menjadi objek utama dalam proses analisis lanjutan.

Dari total 44 aset tersebut, dilakukan pemeringkatan menggunakan *Asset Criticality Ranking* (ACR). Hasilnya, terdapat 22 (dua puluh dua) aset yang masuk

dalam kategori ACR Rank ≤ 30%, yaitu kelompok aset dengan tingkat kritikalitas tertinggi.

Namun, karena terdapat beberapa *common asset* yang digunakan bersama oleh lebih dari satu unit, maka setelah dilakukan penyisihan aset ganda, jumlah aset yang benar-benar unik dan memenuhi kriteria prioritas adalah sebanyak 16 (enam belas) aset (Tabel 4.16). Aset-aset inilah yang direkomendasikan untuk mendapat perhatian utama dalam program pemeliharaan dan *capital investment* ke depan.

Tabel 4. 16 : List Asset Prioritas hasil Analisa

	Nama PLTA	Asset Nilai Terkecil	Nilai RBD Asset	β (beta) Shape	η (eta) Jam	Betas Shape category	ACR Rank	MPI (%)	Prioritas
1	Sidorejo	[ASSET] POWER INTAKE	0,382	0,614	206,216	Infant mortality	3,23%	159,91	1
2	Siteki	[ASSET] POWER INTAKE	0,351	0,387	293,319	Infant mortality	4,00%	159,908	2
3	Tulis Unit 1	[ASSET] POWER INTAKE	0,582	0,251	506,048	Infant mortality	5,13%	159,908	5
4	Lambur Unit 1	[ASSET] PENSTOCK	0,610			Infant mortality	5,88%	81,998	16
5	Garung Unit 1	[ASSET] Excitation System (Emerso)	0,604	2,049	26855,79	Wear-out failure	7,68%	61,200	15
6	PB. Soedirman Unit 1	[ASSET] POWER INTAKE	0,162	0,408	468,424	Infant mortality	8,33%	170,992	4
7	Sempor	[ASSET] Feeder Express 20 KV GB3	0,079	0,66	381,54	Infant mortality	8,89%	134,397	3
8	Tapen	[ASSET] JTM 20 KV	0,069	0,609	621,895	Infant mortality	11,36%	147,046	6
9	Plumbungan	[ASSET] EXCITATION & AVR CONTROL	0,205	0,678	2875,888	Infant mortality	14,00%	136,848	9
10	Siteki	[ASSET] EXCITATION & AVR CONTROL	0,328	0,523	2884,173	Infant mortality	14,00%	136,848	10
11	Plumbungan	[ASSET] INLET VALVE ASSEMBLY	0,642	0,594	13871,080	Infant mortality	18,00%	129,083	13
12	Tulis Unit 1	[ASSET] PLC GOVERNOR	0,404	0,534	1494,131	Infant mortality	23,53%	122,678	8
13	Tulis Unit 2	[ASSET] PLC GOVERNOR	0,609	0,647	7814,424	Infant mortality	23,53%	122,678	12
14	Siteki	[ASSET] CIRCUIT BREAKER	0,170	0,679	899,884	Infant mortality	24,00%	125,842	7
15	Kedungombo	[ASSET] GOVERNOR HYDRAULIK SYSTEM	0,6475	0,619	6709,458	Infant mortality	27,08%	122,283	11
16	Siteki	[ASSET] MAIN CONTROL PANELS	0,592	1,408	15938,848	Wear-out failure	28,00%	139,479	14

Hasil 16 asset ini akan kita jelaskan satu persatu untuk rekomendasi pemeliharaan dengan parameter *weibull Analysis*.

4.3.1 *Power intake* PLTA Sidorejo

Parameter *Weibull Analysis* menghasilkan 2 yaitu β (*Shape Parameter*) yang menunjukkan pola kegagalan dan η (*Eta*) sebagai waktu karakteristik kegagalan.

- β (*Shape Parameter*) = 0,614

  Kategori *infant mortality*, yang berarti kegagalan cenderung terjadi di awal masa operasi. Hal ini menunjukkan adanya kemungkinan masalah sejak awal, seperti kegagalan desain, instalasi yang kurang baik, atau kualitas material yang rendah.

- η (*Eta*) = 206,216 jam

Merupakan waktu karakteristik ketika 63,2% komponen mengalami kegagalan. Aset dengan η = 206,216 jam sebaiknya tidak lagi diandalkan sebagai komponen utama operasional.

- Rekomendasi

  Segera susun proposal untuk penggantian total atau overhaul besar, termasuk pengadaan suku cadang. komponen atau sistem intake ke dalam *Capital Investment* tahunan atau Rencana Jangka Menengah dengan dilakukan analisis akar masalah (*RCA*) lebih lanjut sebelum mengganti aset.

  Selama proses *Capital Investment*, Gunakan monitoring manual atau sensor untuk mengawasi indikator awal kegagalan.

4.3.2 *Power Intake* PLTA Siteki

Parameter *Weibull Analysis* menghasilkan 2 yaitu β (*Shape Parameter*) yang menunjukkan pola kegagalan dan η (*Eta*) sebagai waktu karakteristik kegagalan.

- β (*Shape Parameter*) = 0,351

  Kategori infant mortality, yang berarti kegagalan cenderung terjadi di awal masa operasi. Hal ini menunjukkan adanya kemungkinan masalah sejak awal, seperti kegagalan desain, instalasi yang kurang baik, atau kualitas material yang rendah.

- η (*Eta*) = 293,319 jam

  Merupakan waktu karakteristik ketika 63,2% komponen mengalami kegagalan. Aset dengan η = 293,319 jam sebaiknya tidak lagi diandalkan sebagai komponen utama operasional.

- Rekomendasi

  Segera susun proposal untuk penggantian total atau overhaul besar, termasuk pengadaan suku cadang. komponen atau sistem *intake* ke dalam *Capital Investment* tahunan atau Rencana Jangka Menengah dengan dilakukan analisis akar masalah (*RCA*) lebih lanjut sebelum mengganti

aset. Selama proses *Capital Investment*, Gunakan monitoring manual atau sensor untuk mengawasi indikator awal kegagalan.

4.3.3 *Power intake* PLTA Tulis

Parameter *Weibull Analysis* menghasilkan 2 yaitu β (*Shape Parameter*) yang menunjukkan pola kegagalan dan η (*Eta*) sebagai waktu karakteristik kegagalan.

- β (*Shape Parameter*) = 0,251

  Kategori *infant mortality*, yang berarti kegagalan cenderung terjadi di awal masa operasi. Hal ini menunjukkan adanya kemungkinan masalah sejak awal, seperti kegagalan desain, instalasi yang kurang baik, atau kualitas material yang rendah.
- η (*Eta*) = 506,048 jam

  Merupakan waktu karakteristik ketika 63,2% komponen mengalami kegagalan. Aset dengan η = 506,048 jam sebaiknya tidak lagi diandalkan sebagai komponen utama operasional.
- Rekomendasi

  Segera susun proposal untuk penggantian *total* atau *overhaul* besar, termasuk pengadaan suku cadang. komponen atau sistem *intake* ke dalam *Capital Investment* tahunan atau Rencana Jangka Menengah dengan dilakukan analisis akar masalah (*RCA*) lebih lanjut evaluasi kualitas & *commissioning* awal sebelum mengganti aset.

  Pemeliharaan harus bersifat agresif dan berbasis prediktif, sambil disiapkan untuk penggantian penuh dalam waktu dekat.

4.3.4 *Penstock* PLTA Lambur

Parameter *Weibull Analysis* untuk aset *Penstock* pada PLTA Lambur tidak dapat dianalisis lebih lanjut dikarenakan data historis gangguan hanya terjadi satu kali selama periode observasi. Padahal, metode *Weibull* memerlukan minimal dua hingga tiga data antar kegagalan (*failure intervals*) untuk menghasilkan estimasi parameter yang valid secara statistik. Oleh

karena itu, analisis keandalan berbasis distribusi probabilistik tidak dapat diterapkan pada aset ini.

Meskipun demikian, berdasarkan evaluasi menggunakan *Asset Criticality Ranking* (ACR), aset ini termasuk dalam kategori 10% aset paling kritis, menunjukkan bahwa dari sisi dampak terhadap sistem, penstock memiliki peran yang sangat penting. Namun demikian, nilai *Maintenance Priority Index* (MPI) untuk aset ini relatif tidak tinggi, yaitu sebesar 81,998. Hal ini disebabkan oleh nilai *Repair Status* (RS) yang rendah, menandakan bahwa meskipun aset ini kritis, frekuensi dan tingkat kesulitan perbaikannya belum signifikan selama periode evaluasi.

4.3.5 *Excitation System (emerson)* PLTA Garung Unit 1

Parameter *Weibull Analysis* menghasilkan 2 yaitu β (*Shape Parameter*) yang menunjukkan pola kegagalan dan η (*Eta*) sebagai waktu karakteristik kegagalan.

- β (*Shape Parameter*) = 2,049

  Kategori *Wear-Ou*t (Keausan), menandakan kegagalan lebih banyak terjadi pada akhir masa pakai. Aset mengalami degradasi yang semakin cepat seiring waktu, artinya risiko kegagalan meningkat tajam setelah mendekati nilai η..
- η (*Eta*) = 26855,79 jam

  Merupakan waktu karakteristik ketika 63,2% komponen mengalami kegagalan. Aset dengan η=26855,79 jam (~3 tahun) menandakan komponen ini memiliki performa baik dan layak untuk jangka menengah, namun memerlukan perhatian saat mendekati η.
- Rekomendasi

  Proposal penggantian atau upgrade sistem eksitasi, Alokasi *Capital Investment* untuk 1–2 tahun ke depan.

Rancang *preventive maintenance* secara bertahap saat aset mendekati usia 20.000–25.000 jam, Fokus pada inspeksi internal (modul *AVR*, *brushless system*, dll), pengecekan koneksi, dan uji fungsi.

4.3.6 *Power Intake* PLTA PB. Soedirman

Parameter *Weibull Analysis* menghasilkan 2 yaitu β (*Shape Parameter*) yang menunjukkan pola kegagalan dan η (*Eta*) sebagai waktu karakteristik kegagalan.

- β (*Shape Parameter*) = 0,408

  Kategori *infant mortality*, yang berarti kegagalan cenderung terjadi di awal masa operasi. Hal ini menunjukkan adanya kemungkinan masalah sejak awal, seperti kegagalan desain, instalasi yang kurang baik, atau kualitas material yang rendah.
- η (*Eta*) = 468,424 jam

  Merupakan waktu karakteristik ketika 63,2% komponen mengalami kegagalan. Aset dengan η = 468,424 jam (~19 hari) sebaiknya tidak lagi diandalkan sebagai komponen utama operasional.
- Rekomendasi

  Segera susun proposal untuk penggantian total atau *overhaul* besar, termasuk pengadaan suku cadang. komponen atau sistem intake ke dalam *Capital Investment* tahunan atau Rencana Jangka Menengah dengan dilakukan analisis akar masalah (*RCA*) lebih lanjut sebelum mengganti aset.

  Selama proses *Capital Investment*, Gunakan monitoring manual atau sensor untuk mengawasi indikator awal kegagalan.

4.3.7 *Feeder Express 20 KV GB03* PLTA Sempor

Parameter Weibull Analysis menghasilkan 2 yaitu β (*Shape Parameter*) yang menunjukkan pola kegagalan dan η (Eta) sebagai waktu karakteristik kegagalan.

- β (*Shape Parameter*) = 0,66

Kategori *infant mortality*, yang berarti kegagalan cenderung terjadi di awal masa operasi. Hal ini menunjukkan adanya kemungkinan masalah sejak awal, seperti kegagalan desain, instalasi yang kurang baik, atau kualitas material yang rendah.

- η (Eta) = 381,54 jam

  Merupakan waktu karakteristik ketika 63,2% komponen mengalami kegagalan. Aset dengan η = 381,54 jam (~19 hari) sebaiknya tidak lagi diandalkan sebagai komponen utama operasional.

- Rekomendasi

  Segera susun proposal untuk penggantian *total* atau *overhaul* besar, termasuk pengadaan suku cadang. komponen atau sistem intake ke dalam *Capital Investment* tahunan atau Rencana Jangka Menengah dengan dilakukan analisis akar masalah (*RCA*) lebih lanjut sebelum mengganti aset.

  Selama proses *Capital Investment*, Gunakan monitoring manual atau sensor untuk mengawasi indikator awal kegagalan.

4.3.8 *JTM 20 KV* PLTA Tapen

Parameter *Weibull Analysis* menghasilkan 2 yaitu β (*Shape Parameter*) yang menunjukkan pola kegagalan dan η (*Eta*) sebagai waktu karakteristik kegagalan.

- β (*Shape Parameter*) = 0,609

  Kategori *infant mortality* menunjukkan bahwa kegagalan cenderung terjadi pada awal masa operasi komponen. Pola ini umumnya mengindikasikan adanya potensi masalah sejak tahap awal, seperti kegagalan desain, instalasi yang tidak sesuai standar, atau kualitas material yang rendah.

  Berdasarkan hasil *Root Cause Analysis* (RCA), diketahui bahwa salah satu penyebab utama adalah desain awal jaringan kabel yang terbuka, sehingga memiliki kerentanan tinggi terhadap gangguan dari lingkungan sekitar,

khususnya risiko terkena tumbuhan atau pohon yang tumbuh di jalur distribusi.

- η (*Eta*) = 621,895 jam

  Nilai η (*eta*) merepresentasikan waktu karakteristik di mana sekitar 63,2% komponen diperkirakan mengalami kegagalan. Untuk aset dengan η = 621,895 jam (sekitar 1 bulan operasi), hal ini mengindikasikan bahwa kegagalan dapat terjadi dalam waktu yang relatif singkat.

  Oleh karena itu, diperlukan pemeliharaan rutin secara berkala, khususnya kegiatan rabas-rabas vegetasi di sekitar jalur jaringan, guna mencegah terjadinya gangguan akibat interferensi pohon atau tanaman sebelum kegagalan aktual terjadi.

- Rekomendasi

  Segera susun proposal *Capital Investment* untuk penggantian jaringan kabel terbuka menjadi kabel berisolasi (terbungkus), khususnya pada area dengan vegetasi lebat guna mengurangi risiko gangguan akibat kontak langsung dengan pohon atau tanaman.

  Sambil menunggu proses pengadaan melalui *Capital Investment*, dilakukan pemeliharaan rutin bulanan berupa kegiatan rabas-rabas sebagai tindakan pencegahan untuk menjaga keandalan jaringan selama periode transisi.

4.3.9 *Excitation & AVR Control* PLTA Plumbungan

Parameter *Weibull Analysis* menghasilkan 2 yaitu β (*Shape Parameter*) yang menunjukkan pola kegagalan dan η (*Eta*) sebagai waktu karakteristik kegagalan.

- β (*Shape Parameter*) = 0,678

  Kategori *infant mortality*, yang berarti kegagalan cenderung terjadi di awal masa operasi. Hal ini menunjukkan adanya kemungkinan masalah sejak awal, seperti kegagalan desain, instalasi yang kurang baik, atau kualitas material yang rendah.

- η (*Eta*) = 2875,888 jam

  Waktu karakteristik keandalan hanya sekitar 4 bulan menunjukkan bahwa komponen eksitasi dan *AVR* sering mengalami gangguan atau performa yang tidak stabil dalam waktu singkat sejak mulai digunakan..

- Rekomendasi

  Ajukan *Capital Investment* penggantian modul *AVR/Excitation* baru, evaluasi pemakaian produk dengan reputasi keandalan lebih tinggi (*OEM certified* atau vendor upgrade).

  Selama proses *Capital Investment*, inspeksi mingguan visual dan fungsi, Uji fungsional bulanan terhadap eksitasi, *AVR*, dan sistem sinkronisasi, lakukan kalibrasi ulang jika ditemukan deviasi.

4.3.10 *Excitation & AVR Control* PLTA Siteki

Parameter *Weibull Analysis* menghasilkan 2 yaitu β (*Shape Parameter*) yang menunjukkan pola kegagalan dan η (*Eta*) sebagai waktu karakteristik kegagalan.

- β (*Shape Parameter*) = 0,523

  Kategori *infant mortality*, yang berarti kegagalan cenderung terjadi di awal masa operasi. Hal ini menunjukkan adanya kemungkinan masalah sejak awal, seperti kegagalan desain, instalasi yang kurang baik, atau kualitas material yang rendah.

- η (*Eta*) = 2884,173 jam

  Waktu karakteristik keandalan hanya sekitar 4 bulan menunjukkan bahwa komponen eksitasi dan AVR sering mengalami gangguan atau performa yang tidak stabil dalam waktu singkat sejak mulai digunakan.

- Rekomendasi

  Ajukan *Capital Investment* penggantian modul *AVR/Excitation* baru, evaluasi pemakaian produk dengan reputasi keandalan lebih tinggi (*OEM certified* atau vendor upgrade).

Selama proses *Capital Investment*, inspeksi mingguan visual dan fungsi, Uji fungsional bulanan terhadap eksitasi, *AVR*, dan sistem sinkronisasi, lakukan kalibrasi ulang jika ditemukan deviasi.

4.3.11 *Inlat Valve Assembly* PLTA Plumbungan

Parameter Weibull Analysis menghasilkan 2 yaitu β (*Shape Parameter*) yang menunjukkan pola kegagalan dan η (*Eta*) sebagai waktu karakteristik kegagalan.

- β (*Shape Parameter*) = 0,594

  Kategori infant mortality, yang berarti kegagalan cenderung terjadi di awal masa operasi. Hal ini menunjukkan adanya kemungkinan masalah sejak awal, seperti kegagalan desain, instalasi yang kurang baik, atau kualitas material yang rendah.
- η (*Eta*) = 13871,080 jam

  Waktu karakteristik menunjukkan bahwa sebagian besar komponen akan mulai mengalami kegagalan setelah sekitar 1,5 tahun beroperasi, Usia ini terbilang pendek untuk komponen besar seperti *inlet valve*, yang seharusnya andal hingga lebih dari 25.000–30.000 jam (±3–4 tahun) .
- Rekomendasi

  Segera lakukan penggantian parsial komponen, seperti seal kit, aktuator, atau kontroler, pertimbangkan pengajuan penggantian *preventif* (*Capital Investment*) sebelum mencapai 15.000 jam.

  Pemeriksaan visual seal dan kebocoran setiap bulan, pastikan sensor posisi dan sistem kontrol *valve* bekerja optimal.

4.3.12 *PLC Governor* PLTA Tulis unit 1

Parameter *Weibull Analysis* menghasilkan 2 yaitu β (*Shape Parameter*) yang menunjukkan pola kegagalan dan η (Eta) sebagai waktu karakteristik kegagalan.

- β (*Shape Parameter*) = 0,534

Kategori *infant mortality*, yang berarti kegagalan cenderung terjadi di awal masa operasi. Hal ini menunjukkan adanya kemungkinan masalah sejak awal seperti:

- Gangguan pada kualitas instalasi atau komponen elektronik *PLC*
- Kesalahan konfigurasi awal atau parameter kontrol tidak stabil,
- Gangguan dari lingkungan (kelembaban tinggi, getaran, tegangan tidak stabil).

o η (*Eta*) = 1494,131 jam

Umur andal *PLC* ini sekitar 62 hari atau ± 2 bulan operasi nonstop) jauh di bawah ekspektasi sistem kontrol industri (>10.000 jam), menunjukkan bahwa kerusakan atau gangguan cenderung cepat muncul sejak *commissioning* atau masa awal pengoperasian..

o Rekomendasi

Aset *PLC Governor* PLTA Tulis Unit 1 menunjukkan keandalan sangat rendah dengan risiko kegagalan awal tinggi, yang berbahaya mengingat peran vitalnya dalam sistem kendali turbin.

Rekomendasi utama adalah: audit menyeluruh instalasi dan program, peningkatan frekuensi inspeksi, serta rencana penggantian atau upgrade dalam waktu dekat sebelum mencapai batas umur andal.

Pemeriksaan visual seal dan kebocoran setiap bulan, pastikan sensor posisi dan sistem kontrol *valve* bekerja optimal.

4.3.13 *PLC Governor* PLTA Tulis unit 2

Parameter *Weibull Analysis* menghasilkan 2 yaitu β (*Shape Parameter*) yang menunjukkan pola kegagalan dan η (*Eta*) sebagai waktu karakteristik kegagalan.

o β (*Shape Parameter*) = 0,647

Kategori *infant mortality*, yang berarti kegagalan cenderung terjadi di awal masa operasi. Hal ini menunjukkan adanya kemungkinan masalah sejak awal seperti:

- Gangguan pada kualitas instalasi atau komponen elektronik *PLC*
- Kesalahan konfigurasi awal atau parameter kontrol tidak stabil,
- Gangguan dari lingkungan (kelembaban tinggi, getaran, tegangan tidak stabil).

○ η (*Eta*) = 7824,424 jam

Umur andal *PLC* ini sekitar 325 hari atau ± 11 bulan (operasi *nonstop*) jauh di bawah ekspektasi sistem kontrol industri (>10.000 jam), menunjukkan bahwa kerusakan atau gangguan cenderung cepat muncul sejak *commissioning* atau masa awal pengoperasian.

○ Rekomendasi

Aset *PLC Governor* PLTA Tulis Unit 2 menunjukkan keandalan sangat rendah dengan risiko kegagalan awal tinggi, yang berbahaya mengingat peran vitalnya dalam sistem kendali turbin.

Rekomendasi utama adalah: audit menyeluruh instalasi dan program, peningkatan frekuensi inspeksi, serta rencana penggantian atau upgrade dalam waktu dekat sebelum mencapai batas umur andal.

Pemeriksaan visual seal dan kebocoran setiap bulan, pastikan sensor posisi dan sistem kontrol *valve* bekerja optimal.

4.3.14 *Circuit Breaker* PLTA Siteki

Parameter *Weibull Analysis* menghasilkan 2 yaitu β (*Shape Parameter*) yang menunjukkan pola kegagalan dan η (*Eta*) sebagai waktu karakteristik kegagalan.

○ β (*Shape Parameter*) = 0,679

Kategori infant mortality, yang berarti kegagalan cenderung terjadi di awal masa operasi. Hal ini menunjukkan adanya kemungkinan masalah sejak awal, umumnya disebabkan oleh:

- Kualitas instalasi buruk (*misalignment*, koneksi longgar),
- Kesalahan desain sistem *proteksi*,
- Material kontak atau aktuator yang tidak tahan beban,

- η (*Eta*) = 899,884 jam

  Umur andal sekitar 37 hari jauh di bawah ekspektasi sistem *Circuit Breaker* (CB) seharusnya andal untuk ribuan hingga puluhan ribu jam, tergantung jenis dan kelasnya.

- Rekomendasi

  Circuit Breaker PLTA Siteki memiliki pola kegagalan awal (β < 1) dengan η sangat rendah (~900 jam). Ini menandakan risiko tinggi terhadap gangguan sistem proteksi dalam waktu dekat.

  Rekomendasi utama: lakukan inspeksi menyeluruh dan uji fungsi proteksi, serta rencanakan penggantian atau *overhaul preventif* sesegera mungkin agar keandalan sistem tetap terjaga.

4.3.15 *Governor Hydrauik System* PLTA Kedungombo

Parameter *Weibull Analysis* menghasilkan 2 yaitu β (*Shape Parameter*) yang menunjukkan pola kegagalan dan η (*Eta*) sebagai waktu karakteristik kegagalan.

- β (*Shape Parameter*) = 0,619

  Kategori *infant mortality*, yang berarti kegagalan cenderung terjadi di awal masa operasi. Hal ini menunjukkan adanya kemungkinan masalah sejak awal, umumnya disebabkan oleh:

  - Instalasi awal yang tidak presisi,
  - Kontaminasi fluida hidrolik,
  - Masalah *seal*, silinder, atau pompa sejak dini,
  - Komponen tidak sesuai spesifikasi operasi (tekanan, suhu, viskositas).

- η (Eta) = 6709,458 jam

  Untuk sistem governor hidrolik, η idealnya mencapai di atas 15.000 jam. Nilai 6.700-an jam menandakan sistem hanya bisa diandalkan kurang dari 1 tahun sebelum mulai menunjukkan degradasi performa atau kegagalan.

- Rekomendasi

Governor Hydraulic System PLTA Kedungombo menunjukkan pola kegagalan awal (β = 0,619) dengan usia andal hanya 6.700 jam, menandakan potensi gangguan teknis dalam waktu kurang dari satu tahun.

Rekomendasi utama meliputi:

- Audit sistem hidrolik dan fluida,
- Peningkatan jadwal preventive maintenance,
- Perencanaan peremajaan komponen sebelum η tercapai,
- Dan pertimbangan *Capital Investment* jangka menengah untuk meningkatkan keandalan jangka panjang.

4.3.16 *Main Control Panels* PLTA Siteki

Parameter *Weibull Analysis* menghasilkan 2 yaitu β (*Shape Parameter*) yang menunjukkan pola kegagalan dan η (*Eta*) sebagai waktu karakteristik kegagalan.

- β (*Shape Parameter*) = 1,408

  Nilai β > 1 mengindikasikan bahwa kegagalan komponen tidak terjadi secara acak, tetapi cenderung meningkat seiring waktu akibat keausan mekanis atau penurunan performa, Ini adalah pola normal untuk sistem mekanikal seperti governor hidrolik, terutama pada komponen:

  - Silinder dan *seal*,
  - Pompa hidrolik,
  - Katup kontrol tekanan,
  - Piston aktuator..

- η (Eta) = 15938,848 jam

  Umur andal mendekati 16.000 jam menunjukkan bahwa sistem dapat berfungsi dengan baik selama hampir 2 tahun operasi penuh, selama pemeliharaan dilakukan tepat waktu dan sesuai prosedur.

- Rekomendasi

Aset *Governor Hydraulic System* PLTA Kedungombo berada dalam kondisi cukup andal, dengan usia pakai optimal ±16.000 jam dan pola kegagalan alami akibat keausan.

Tindakan utama adalah menyusun jadwal *overhaul* atau penggantian komponen kritis sebelum 16.000 jam, serta monitoring performa secara berkala sejak jam operasi melewati 12.000 jam.

Pemeliharaan yang direkomendasikan yaitu:

- Jadwalkan overhaul komponen utama (pompa, seal, katup) saat mendekati atau sebelum mencapai 16.000 jam operasi,
- Gunakan pendekatan *condition-based maintenance* jika tersedia sensor tekanan atau *flow rate* Audit sistem hidrolik dan fluida,
- Mulai monitor performa dan gejala penurunan sejak sistem mencapai 12.000–13.000 jam, seperti *Respons governor* melambat, tanda-tanda kebocoran fluida, Penurunan tekanan hidrolik atau suara abnormal.
- Melakukan *Predictive maintenance* pada kualitas fluida secara berkala: viskositas, kontaminan partikel, *water content*, *varnis* maupun keasaman.

4.4 Pembuktian hipotesa

Berdasarkan hasil pengolahan dan analisis data yang telah dilakukan pada bab sebelumnya, maka pada subbab ini dilakukan pembuktian terhadap hipotesis yang telah dirumuskan pada Bab I.

Hipotesis utama dalam penelitian ini menyatakan bahwa:

"Pendekatan *Reliability* berbasis evaluasi *Reliability Block Diagram* (RBD), *Weibull Analysis*, serta metode *Asset Criticality Ranking* (ACR) dan *Maintenance Priority Index* (MPI), dapat digunakan untuk mengidentifikasi dan menentukan prioritas pemeliharaan aset dan penentuan prioritas *Capital Investment* secara efektif di lingkungan pembangkit tenaga listrik."

Pembuktian hipotesa dilakukan melalui:

1. Evaluasi *Reliability* (RBD) dan *Weibull Analysis* terhadap 44 aset menunjukkan bahwa terdapat aset dengan nilai keandalan < 0,7 yang berisiko tinggi mengalami kegagalan. Hasil ini mendukung bahwa model keandalan kuantitatif dapat mengidentifikasi aset kritis berdasarkan probabilitas kegagalan.
2. Penggunaan ACR dan MPI memberikan justifikasi berbasis kombinasi dampak dan probabilitas, yang terbukti mampu menyaring dan mengurutkan aset-aset prioritas tinggi. Hal ini terlihat pada hasil analisis yang menghasilkan 16 aset prioritas dari gabungan nilai *reliability* < 0,7 dan ranking ACR ≤ 30%.
3. Rekomendasi teknis hasil *Weibull* memperkuat bahwa data historis gangguan dapat dikonversi menjadi informasi *preventif* yang berguna untuk menyusun strategi pemeliharaan yang lebih efisien dan berbasis bukti.

Dengan demikian, hipotesa yang diajukan **dapat diterima**, karena pendekatan yang digunakan telah berhasil mengidentifikasi aset prioritas dengan landasan analitis yang kuat, serta menghasilkan rekomendasi teknis berbasis data yang valid dan aplikatif untuk mendukung kegiatan perencanaan pemeliharaan.

Tabel 4. 17 : Perbandingan metode awal (ACR & MPI) dengan Metode Baru (RBD)

Aspek	ACR & MPI	RBD
Pendekatan	Ranking berdasarkan dampak & kondisi fisik aset.	Pemodelan sistem menyeluruh (seri-paralel) antar komponen.
Output utama	Daftar aset prioritas (Top 10–30%).	Nilai reliability tiap subsistem & identifikasi *bottleneck*.
Jumlah aset prioritas	16 aset prioritas (reliability < 0,7 + ACR ≤ 30%).	22 aset reliability < 0,7 (lebih luas cakupan analisis).
Kelebihan	Objektif, mudah diterapkan untuk ranking aset.	Memberi gambaran menyeluruh & kuantitatif, terintegrasi dengan Weibull.
Kelemahan	Tidak menggambarkan interaksi antar komponen; fokus per unit.	Lebih kompleks, butuh data detail & pemodelan sistem.

Metode ACR & MPI efektif untuk menentukan ranking aset secara praktis, namun terbatas pada level individu. Sementara metode RBD lebih unggul karena

mampu mengevaluasi keandalan sistem secara menyeluruh, memetakan bottleneck, dan memberi dasar kuat untuk keputusan O&M maupun Capital Investment.

BAB V
PENUTUPAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil kajian, pengolahan data, dan analisis terhadap keandalan aset pada sistem pembangkit listrik tenaga air (PLTA) dapat disimpulkan hal-hal sebagai berikut:

1. Evaluasi *Reliability Block Diagram* (RBD) terhadap 44 aset menunjukkan bahwa terdapat 22 aset dengan nilai *reliability* di bawah 0,7, yang mengindikasikan tingginya potensi kegagalan dan menjadi fokus utama dalam analisis lanjutan.
2. Analisis distribusi *Weibull* mampu mengidentifikasi pola kegagalan aset secara kuantitatif. Aset dengan nilai $\beta < 1$ mengindikasikan risiko *infant mortality*, sedangkan $\beta > 1$ menunjukkan kegagalan akibat keausan. Nilai η digunakan untuk menentukan waktu karakteristik kegagalan dan perencanaan pemeliharaan dan strategi pemeliharaan preventif & prediktif dapat berbasis dari hasil data RBD dan Weibull .
3. Penerapan metode analisis OCR, SCR, ACR, dan MPI dipakai untuk mendukung pengambilan keputusan berbasis data dan berhasil mengurutkan tingkat kekritisan masing-masing aset berdasarkan pengaruh terhadap sistem dan frekuensi gangguan. Sebanyak 16 aset diprioritaskan berdasarkan gabungan nilai *reliability* dan *ranking* ACR $\leq$ 30%.
4. Pendekatan ini membuktikan bahwa kombinasi metode RBD, *Weibull Analysis*, ACR, dan MPI efektif dalam mengidentifikasi aset prioritas serta mendukung pengambilan keputusan teknis yang tepat dalam penyusunan strategi pemeliharaan.

5.2 Saran

Agar hasil analisis ini dapat diimplementasikan secara optimal dan berkelanjutan, maka disarankan beberapa hal sebagai berikut:

1. Perlu dilakukan pengkinian data gangguan aset secara berkala, terutama dalam sistem Maximo atau CMMS lainnya, untuk memastikan bahwa parameter *reliability* dan *Weibull* selalu merefleksikan kondisi aktual.
2. Evaluasi *Weibull* perlu dilengkapi dengan investigasi teknis lapangan guna mengonfirmasi akar penyebab dari nilai β rendah (*infant mortality*), seperti kesalahan desain, instalasi, atau kualitas komponen.
3. Aset dengan nilai η sangat rendah (< 2.000 jam) sebaiknya menjadi prioritas dalam penyusunan program *Capital Investment* atau penggantian *preventif*, terutama jika termasuk kategori ACR dan MPI tinggi.
4. Disarankan agar penggunaan metode ini diperluas ke seluruh unit pembangkit sebagai bagian dari strategi pemeliharaan berbasis data (*data-driven maintenance*).

DAFTA PUSTAKA

Bradley, E. (2022). ISO 55000. In *Reliability Engineering*. https://doi.org/10.1201/9781003326489-11

Carnevali, L., Ciani, L., Fantechi, A., Gori, G., & Papini, M. (2021). An efficient library for reliability block diagram evaluation. *Applied Sciences (Switzerland)*, *11*(9). https://doi.org/10.3390/app11094026

Elsayed, A. (2012). *RELIABILITY ENGINEERING*.

Fabianek, D., Legat, V., & Ales, Z. (2021). Weibull'S Analysis Of The Dependability Of Critical Components Of Selected Agricultural Machinery. *Manufacturing Technology*, *21*(5), 606–615. https://doi.org/10.21062/mft.2021.076

Guze, S., & Chybowska, D. (2020). A multiphase process approach to the analysis of the reliability and safety in maritime transport systems. *TransNav*, *14*(4), 985–990. https://doi.org/10.12716/1001.14.04.25

Hakim, L., Studi Teknik Mesin, P., Teknik, F., Muhammadiyah Riau Jalan Tuanku Tambusai Ujung, U., Tampan, K., & Delima, K. (2021). *Implementasi RCM pada mesin diesel Deutz 20 kVA*.

Jagtap, H. P., Bewoor, A. K., Kumar, R., Ahmadi, M. H., El Haj Assad, M., & Sharifpur, M. (2021). RAM analysis and availability optimization of thermal power plant water circulation system using PSO. *Energy Reports*, *7*, 1133–1153. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.12.025

Kipchumba, B., Chemweno, P., Nganyi, E., & Ochola, J. (2023). *Utilizing Weibull Distribution for Fitting System Data and Time Between Maintenance Operations to Derive Maintenance Schedules and Parameters for Critical Equipment in a Textile Industry*. https://doi.org/10.22541/au.169159708.80588379/v1

O'Connor, P. D. T. (1987). Introduction to reliability engineering. E. E. Lewis, Wiley, New York, 1987. No. of pages 400. Price: £52.75 (U.K.). *Quality and Reliability Engineering International*, *3*(4). https://doi.org/10.1002/qre.4680030416

O'Connor, P. D. T. (1998). An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering, Charles E. Ebeling, McGraw-Hill, 1997. Number of pages: 489. Price: £22.99. *Quality and Reliability Engineering International*, *14*(4). https://doi.org/10.1002/(sici)1099-1638(199807/08)14:4<295::aid-qre197>3.0.co;2-y

O'Connor, P. D. T., & KLEYNER, A. (2011). *Practical Reliability Engineering Fifth Edition*.

Ramesh Gulati. (2012). *Maintenance and Reliability Best Practices* (2nd ed.). Industrial Press.

Ripaldi, Z. M. (2020). *ANALISA KEANDALAN UNIT PRODUKSI CONTINUOUS TANDEM COLD MILL MENGGUNAKAN METODE RELIABILITY BLOCK DIAGRAM*.

Rosihan, R. I., & Yuniarto, H. A. (2019). Analisis Sistem Reliability dengan Pendekatan Reliability Block Diagram. *Jurnal Teknosains*, *9*(1), 57. https://doi.org/10.22146/teknosains.36758

Santoso, R., & Anugraheni, A. (2018). *RELIABILITAS DAN AVAILABILITAS SISTEM TIGA KOMPONEN TERSUSUN PARALEL BERSERI* (Vol. 6, Issue 2). http://jurnal.unimus.ac.id

Szewczyk, P., & Łebkowski, A. (2023). Reliability Evaluation of Electrochemical Energy Storage Systems Supplying the Ship's Main Propulsion System. *TransNav*, *17*(1), 87–94. https://doi.org/10.12716/1001.17.01.08

Widharto, Y., Iskandari, D., Nurkertamanda, D., & Korespondensi, P. (2018). ANALISIS HUMAN RELIABILITY ASSESSMENT DENGAN METODE HEART (STUDI KASUS PT ABC). In *Jurnal Teknik Industri* (Vol. 13, Issue 3).