

USULAN WAKTU PERAWATAN DAN PERBAIKAN BERDASARKAN KEANDALAN PADA BAGIAN BOILER DI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP

Iing Pamungkas*¹, Heri Tri Irawan², Arhami³, Muhammad Dirhamsyah⁴

^{1,2}Jurusan Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas Teuku Umar

^{3,4}Jurusan Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Syiah Kuala

e-mail: *¹pamungkas.iing@gmail.com, ³arhami@unsyiah.ac.id

Abstrak

PT. PLN (Persero) adalah pengelola tunggal industri listrik di Indonesia yang dimiliki oleh pemerintah Indonesia dalam bentuk Badan Usaha Milik Negara. Pembangkit listrik tenaga uap adalah salah satu pembangkit listrik terkemuka di Indonesia. Provinsi Aceh memiliki satu pembangkit listrik tenaga uap yang terletak di Kabupaten Nagan Raya dan memiliki dua unit pembangkit dengan kapasitas terpasang 2x110 Megawatt. Namun, pemadaman listrik tidak dapat dihindari dan masih sering terjadi jika salah satu pembangkit mengalami gangguan atau rusak. Kegiatan pemeliharaan korektif dan pemeliharaan keseluruhan adalah salah satu penyebab tingginya frekuensi gangguan atau kerusakan, terutama di bagian boiler. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan waktu perawatan dan perbaikan yang diusulkan untuk mencapai tingkat keandalan hingga 80% di setiap peralatan boiler yang penting. Waktu perawatan dan perbaikan yang diusulkan dapat diperoleh berdasarkan waktu historis sampai kegagalan dan waktu untuk memperbaiki data. Waktu perawatan dan perbaikan yang baik dapat dinilai berdasarkan nilai keandalan yang tinggi. Hasil yang diperoleh bahwa waktu perawatan yang diusulkan adalah 67 jam hingga 585 jam untuk mencapai nilai keandalan 80% pada delapan peralatan penting bagian boiler. Sementara waktu perbaikan yang diusulkan adalah dari 1.036 jam hingga 1.497 jam untuk mencapai nilai keandalan 80% pada delapan peralatan penting bagian boiler.

Kata Kunci: Boiler, Keandalan, Perawatan, Perbaikan

Abstract

PT. PLN (Persero) is the sole manager of the electricity industry in Indonesia which is owned by the Indonesian government in the form of a State-Owned Enterprise. Steam power plant is one of the leading power plants in Indonesia. Aceh Province has one steam power plant located in Nagan Raya Regency and has two generating units with an installed capacity of 2x110 Megawatts. However, a power outage is unavoidable and still often occurs if one of the plants is damaged or damaged. Corrective maintenance activities and overall maintenance is one of the causes of the high frequency of interference or damage, especially in the boiler section. This study aims to determine the proposed maintenance and repair time to achieve a reliability level of up to 80% in every important boiler component. The proposed maintenance and repair time can be obtained based on historical time to failure and time to repair data. Good maintenance and repair time can be assessed based on high reliability values. The results obtained that the proposed maintenance time is 67 hours to 585 hours to achieve 80% reliability value on eight important components in the boiler section. While the proposed repair time is from 1,036 hours to 1,497 hours to reach 80% reliability value on eight important components in the boiler section.

Keywords: Boiler, Reliability, Maintenance, Repair

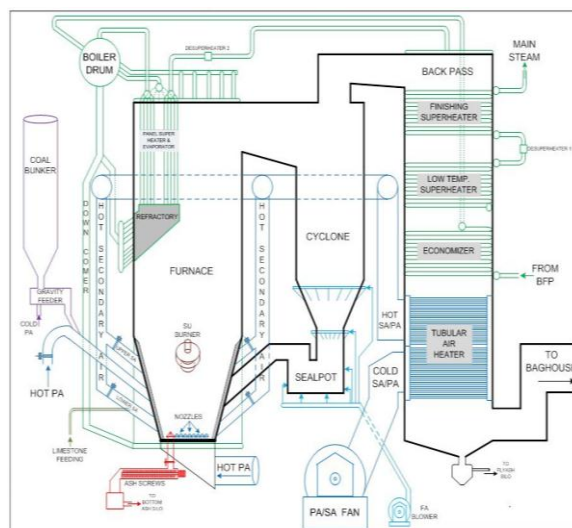
1. PENDAHULUAN

Energi listrik memiliki peran penting dalam era revolusi industri 4.0 yang ditandai dengan semakin meningkatnya konsumsi akan energi listrik dewasa ini. Jumlah penduduk dan ekonomi

yang terus bertumbuh sangat membutuhkan dukungan industri energi listrik yang memadai. Selain itu, kehidupan modern yang memanfaatkan perkembangan teknologi turut berpengaruh terhadap meningkatnya konsumsi energi listrik. Namun peran signifikan tersebut tidak berimbang dengan kemampuan industri energi listrik dalam memenuhi peningkatan kebutuhan energi listrik khususnya di Indonesia. Akselerasi pembangunan pembangkit listrik baru di seluruh wilayah Indonesia sangat dibutuhkan sebagai langkah antisipasi agar defisit energi listrik dapat ditanggulangi.

PT. PLN (Persero) merupakan pengelola tunggal industri energi listrik di Indonesia yang dimiliki oleh pemerintah Indonesia dalam bentuk Badan Usaha Milik Negara (BUMN). PT. PLN (Persero) menggunakan beberapa pembangkit listrik dalam menjalankan operasional perusahaan dan salah satunya yaitu Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). PLTU menjadi salah satu pembangkit unggulan karena selain memiliki kapasitas besar, ketersediaan dan terjangkaunya harga batubara dibandingkan dengan harga minyak bumi menjadikan PLTU banyak digunakan di Indonesia. Provinsi Aceh terdapat salah satu PLTU yang terletak di Kabupaten Nagan Raya dan menjadi salah satu tulang punggung dalam memenuhi kebutuhan listrik di Aceh dan Sumatera Utara. PLTU Nagan Raya memiliki dua unit pembangkit dengan kapasitas terpasang sebesar 2x110 Megawatt dan kapasitas terpakainya sebesar 2x80 Megawatt. Namun pemadaman listrik tidak dapat dihindari dan masih sering terjadi apabila salah satu pembangkit mengalami gangguan atau kerusakan.

PLTU Nagan Raya 2x110 Megawatt dalam sistem produksinya memiliki beberapa bagian utama seperti *boiler*, *turbine* dan *generator*. *Boiler* merupakan bagian yang memiliki frekuensi gangguan atau kerusakan tertinggi dibandingkan bagian *turbine* dan *generator*. Sistem produksi pembangkit listrik tenaga uap umumnya sangat bergantung pada kinerja *boiler*, tidak terkecuali PLTU Nagan Raya. *Boiler* pada dasarnya berfungsi sebagai alat penghasil uap panas bertekanan tinggi hasil dari pembakaran batubara, yang kemudian akan digunakan untuk menggerakkan *turbine* sehingga menghasilkan energi listrik. PLTU Nagan Raya berbasis *boiler circulating fluidizing bed* (CFB) dan secara sistem dapat dilihat pada Gambar 1 berikut ini.



Gambar 1. Sistem *Boiler* di PLTU Nagan Raya

Berdasarkan Gambar 1, *boiler* memiliki beberapa peralatan yang saling berkaitan antara satu dengan yang lain. Apabila salah satu peralatan mengalami gangguan atau kerusakan maka akan mempengaruhi performa keseluruhan sistem produksi. Kegiatan perawatan korektif dan perawatan keseluruhan (*overhaul*) yang dilakukan pihak PLTU Nagan Raya menjadi salah satu penyebab tingginya frekuensi gangguan atau kerusakan. Maka dari itu perlu dilakukan suatu usulan waktu perawatan dan waktu perbaikan untuk meminimalisir gangguan atau kerusakan tersebut. Selain itu

dengan adanya usulan waktu perawatan dan waktu perbaikan juga akan meningkatkan kinerja keandalan (*reliability*).

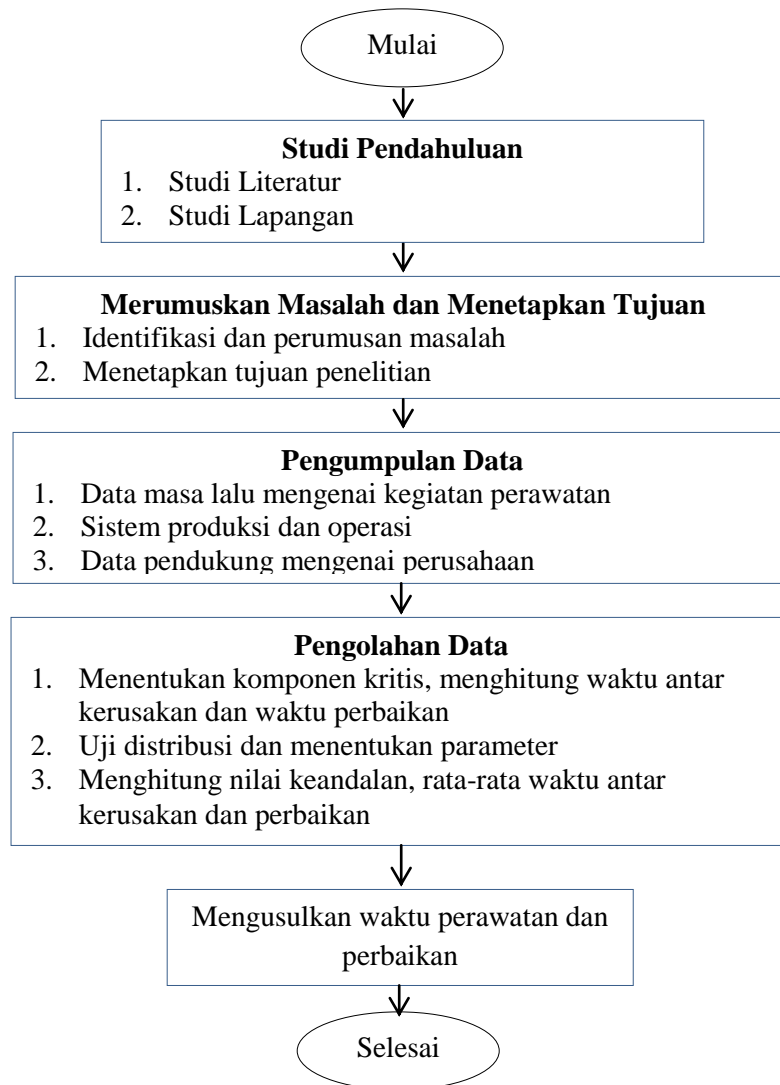
Keandalan merupakan salah satu ukuran keberhasilan sistem perawatan sehingga nilai keandalan sangat bergantung pada sistem perawatan yang diterapkan oleh suatu perusahaan. Nilai keandalan diperoleh berdasarkan data riwayat waktu antar kerusakan atau *time to failure* (TTF) dan waktu perbaikan atau *time to repair* (TTR). Nilai keandalan yang tinggi mencerminkan baiknya sistem perawatan yang dilakukan oleh perusahaan. Nilai keandalan minimal 80% dapat dijadikan acuan karena merupakan rekomendasi dari *Reliability Standard Power Plant*. Untuk mencapai nilai keandalan 80%, perlu tindakan perawatan sebelum terjadinya gangguan atau kerusakan atau umumnya sering disebut *preventive maintenance*. Adapun beberapa penelitian terdahulu yang berkaitan dengan penelitian ini seperti mengusulkan waktu perawatan dengan menggunakan simulasi monte carlo berdasarkan nilai keandalan [1-2], menjadwalkan waktu perawatan dan perbaikan untuk meminimalkan biaya berdasarkan nilai keandalan [3] dan menganalisis sistem keandalan serta risikonya hingga diperoleh waktu perawatan, perbaikan dan tingkat risikonya [4].

Adapun tujuan penelitian ini adalah menentukan usulan waktu perawatan dan perbaikan hingga mencapai tingkat keandalan mencapai 80% pada setiap komponen kritis bagian *boiler*.

2. METODE PENELITIAN

2.1. Prosedur Penelitian

Adapun prosedur penelitian akan menjelaskan tahapan-tahapan yang dilakukan dalam melakukan penelitian dan dapat dilihat secara garis besar pada Gambar 2.



Gambar 2. Prosedur Penelitian

2.2. Rancangan Penelitian

2.2.1. Menentukan Peralatan Kritis, Menghitung Waktu Antar Kerusakan dan Waktu Perbaikan

Peralatan kritis pada penelitian ini adalah peralatan pada bagian *boiler* yang sering mengalami gangguan atau kerusakan berdasarkan riwayat data kerusakan. Peralatan-peralatan tersebut kemudian akan ditentukan waktu antar kerusakannya atau *time to failure* (TTF) dan waktu perbaikannya atau *time to repair* (TTR). Peralatan yang memiliki intensitas kerusakan paling tinggi kemudian akan masuk ke tahap perhitungan selanjutnya.

2.2.2. Melakukan Uji Distribusi (*index of fit*) dan Menentukan Parameter (*goodness of fit*)

Uji distribusi (*index of fit*) dilakukan untuk mengetahui jenis distribusi dari data waktu antar kerusakan (TTF) dan waktu perbaikan (TTR) aktual dari peralatan kritis. Uji distribusi dilakukan karena setiap peralatan mesin memiliki distribusi kerusakan yang berbeda-beda. Beberapa dugaan distribusi akan digunakan untuk menentukan pola data kerusakan yaitu distribusi *Normal*, *Lognormal*, *Weibull* dan *Exponential*. Distribusi terpilih akan ditentukan menggunakan dua metode penilaian yaitu Anderson Darling (AD) dan Pearson *correlation coefficient*. Nilai Anderson Darling menggunakan pendekatan *weighted squared distance* yaitu ditentukan berdasarkan nilai Anderson Darling terkecil. Sedangkan nilai Pearson *correlation coefficient* menggunakan pendekatan *least squares estimates* yaitu ditentukan berdasarkan nilai *correlation*

coefficient terbesar. Parameter ditentukan berdasarkan distribusi yang telah terpilih sebelumnya. Uji distribusi dan penentuan parameter akan menggunakan bantuan program Minitab 16.

2.2.3. Menghitung *Mean Time to Failure* (MTTF), *Mean Time to Repair* (MTTR) dan Keandalan Aktual

Mean time to failure (MTTF) merupakan nilai rata-rata interval waktu antar kerusakan dari sebuah distribusi data kerusakan yang bermanfaat untuk mengetahui kinerja dan kemampuan dari peralatan. Sedangkan *mean time to repair* (MTTR) merupakan rata-rata interval waktu yang dibutuhkan dalam kegiatan perbaikan kerusakan. Keandalan akan menunjukkan kemampuan mesin berfungsi tanpa terjadinya kegagalan. Perhitungan MTTF, MTTR dan keandalan memerlukan nilai parameter yang telah dihitung sebelumnya. Setiap perhitungan akan berbeda berdasarkan parameter yang sesuai dengan distribusi data yang ada. Beberapa persamaan tersebut yaitu [5]:

1. Distribusi *Weibull* dengan parameter yang digunakan yaitu θ (parameter skala), β (parameter bentuk). Fungsi-fungsi distribusi *Weibull* adalah:

- a. *Mean time to failure* (MTTF) atau *mean time to repair* (MTTR)

$$\text{MTTF atau MTTR} = \gamma + \theta \cdot \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \quad (1)$$

- b. Fungsi keandalan (R)

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\theta}\right)^\beta} \quad (2)$$

di mana $\theta > 0$, $\beta > 0$, dan $t > 0$

2. Distribusi *Lognormal* dengan parameter yang digunakan yaitu t_{med} (parameter lokasi) dan s (parameter bentuk). Fungsi-fungsi distribusi *Lognormal* adalah:

- a. *Mean time to failure* (MTTF) atau *mean time to repair* (MTTR)

$$\text{MTTF atau MTTR} = t_{\text{med}} e^{\left[\frac{s^2}{2}\right]} \quad (3)$$

- b. Fungsi keandalan

$$R(t) = 1 - \Phi \left(\frac{1}{s} \ln \frac{t}{t_{\text{med}}} \right) \quad (4)$$

di mana: $s > 0$, $t_{\text{med}} > 0$ dan $t > 0$

3. Distribusi *Normal* dengan parameter yang digunakan yaitu μ (nilai tengah) dan σ (standar deviasi). Fungsi-fungsi distribusi *Normal* adalah:

- a. *Mean time to failure* (MTTF) atau *mean time to repair* (MTTR)

$$\text{MTTF atau MTTR} = \mu \quad (5)$$

- b. Fungsi keandalan (R)

$$R(t) = 1 - \Phi \left(\frac{t - \mu}{\sigma} \right) \quad (6)$$

di mana: $\mu > 0$, $\sigma > 0$ dan $t > 0$

4. Distribusi *Exponential* dengan parameter yang digunakan yaitu λ (laju kerusakan). Fungsi-fungsi distribusi *exponential* adalah:

- a. *Mean time to failure* (MTTF) atau *mean time to repair* (MTTR)

$$\text{MTTF atau MTTR} = \gamma + \frac{1}{\lambda} \quad (7)$$

- b. Fungsi keandalan (R)

$$R(t) = e^{-\lambda(t-\gamma)} \quad (8)$$

di mana: $t > 0$, $\lambda > 0$

2.2.4. Melakukan Usulan Waktu Perawatan dan Perbaikan

Usulan waktu perawatan dan perbaikan dilakukan setelah mengetahui nilai keandalan pada setiap peralatan kritis *boiler*. Untuk memperoleh waktu perawatan dan perbaikan yang memenuhi rekomendasi *Reliability Standard Power Plant* yaitu sebesar 80%, maka akan dilakukan simulasi pada setiap waktu. Simulasi waktu perawatan dan perbaikan akan ditetapkan berbeda, tergantung pada setiap komponen kritis bagian *boiler* hingga tujuan penelitian tercapai.

2.3. Tempat dan Objek Penelitian

Penelitian dilakukan pada PT. PLN (Persero), Pembangkitan Sumatera Bagian Utara, Sektor Pembangkitan Nagan Raya yang terletak di Jalan Meulaboh-Tapak Tuan Km 8,5 Desa Suak Puntong, Kecamatan Kuala Pesisir, Kabupaten Nagan Raya, Provinsi Aceh. Sedangkan objek penelitian yaitu peralatan-peralatan yang mengalami gangguan atau kerusakan pada bagian *boiler* di PLTU Nagan Raya.

2.4. Metode Pengumpulan Data

Adapun beberapa metode pengumpulan data yang digunakan dalam penelitian ini antara lain:

1. Wawancara secara individual dengan pihak perusahaan, terutama pada bagian pemeliharaan atau perawatan (*maintenance*). Wawancara dilakukan untuk mendapatkan informasi mengenai cara pemeliharaan atau perawatan yang dilakukan perusahaan, masalah-masalah yang timbul dalam kerusakan terutama pada bagian *boiler* serta informasi keadaan lingkungan perusahaan.
2. Dokumentasi yaitu mengumpulkan data hasil dokumentasi perusahaan yang berhubungan dengan penelitian berupa data riwayat kegiatan perawatan berdasarkan peralatan yang mengalami kerusakan pada bagian *boiler*.
3. Observasi yaitu melakukan pengamatan secara langsung pada kegiatan pemeliharaan atau perawatan terutama bagian *boiler*.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Spesifikasi dan Cara Kerja *Boiler*

Boiler berfungsi sebagai alat penghasil uap panas bertekanan tinggi hasil dari pembakaran batubara, yang kemudian akan digunakan untuk menggerakkan *turbine* sehingga menghasilkan listrik. PLTU Nagan Raya 2x110 megawatt menggunakan *boiler* dengan spesifikasi teknis sebagai berikut:

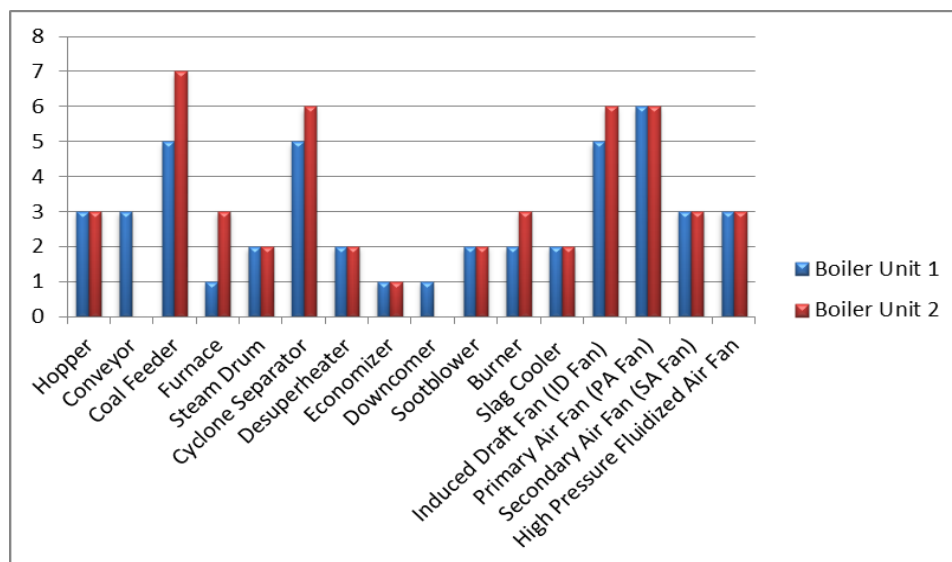
Merek	: Wuxi Huaguan Boiler Co, Ltd
Model	: UG-430/9.8-M
Steam Temperature	: 540 ⁰ C
Steam Pressure	: 9.8 MPa
Product Number	: 09046
Manufacturing License	: TS2110520-2010

PLTU Nagan Raya 2x110 MW pada proses pembakarannya menggunakan *boiler circulating fluidizing bed (boiler CFB)*. *Boiler* ini tidak menggunakan *mill pulverizer* dan batubara yang digunakan ukuran diameter sekitar 30 mm serta dilengkapi dengan *cyclone separator*. *Cyclone separator* berfungsi untuk memisahkan *fly-ash* yang digunakan untuk memanaskan *superheater*, *economizer* dan *air heater*. *Fly-ash* akan dibuang melalui *stack* setelah melewati *electrostatic precipitator* untuk menyaring gas buang yang berbahaya bagi lingkungan. Partikel *fly ash* yang tidak terbakar akan dikembalikan lagi ke ruang bakar *furnace* dan digunakan kembali untuk memanaskan sebagian besar *superheater*, *economizer* dan *air heater*. *Boiler* tipe ini juga merupakan *boiler* tipe minus atau memiliki kekurangan karena hanya menggunakan *induced draft fan* tanpa menggunakan *force draft fan*. Selain *induced draft fan*, juga terdapat *primary air fan*, *secondary air fan* dan *high pressure fluidizing air fan*. *Primary air fan* berfungsi sebagai udara

yang menerbangkan *bed material* agar terjadinya sistem *fluidizing*. *Secondary air fan* berfungsi sebagai udara bakar di dalam *furnace*. Sedangkan *high pressure fluidizing air fan* berfungsi sebagai aliran udara untuk mengembalikan *bed material* yang terbawa ke *cyclone separator* agar kembali lagi ke *furnace*.

3.2. Menentukan Peralatan Kritis

Boiler merupakan objek yang akan dijadikan bahan penelitian karena memiliki frekuensi kerusakan yang paling tinggi diantara bagian lainnya. PLTU Nagan Raya memiliki dua unit *boiler*. Adapun data kerusakan yang diperoleh yaitu data kerusakan dalam rentang waktu enam bulan dalam rentang waktu bulan Maret 2015 hingga Agustus 2015. Peralatan kritis akan ditentukan berdasarkan peralatan yang mengalami minimal empat kali kerusakan karena apabila data kerusakan kurang dari empat kali maka data tidak dapat diproses lebih lanjut. Adapun daftar nama peralatan dan frekuensi terjadinya kerusakan dalam rentang waktu tersebut dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Daftar Nama Peralatan Rusak Pada Boiler Unit 1 dan 2

Berdasarkan Gambar 3 dapat ditentukan bahwa yang termasuk peralatan kritis pada *boiler* unit 1 dan 2 yaitu peralatan *cyclone separator*, *coal feeder*, *ID fan* dan *PA fan*. Delapan peralatan tersebut kemudian akan dilakukan perhitungan lebih lanjut dengan menggunakan data yang telah dimiliki.

3.3. Penyebab Masalah Peralatan Rusak Pada *Boiler*

Sebelum dilakukan perhitungan mengenai keandalan, terlebih dahulu akan ditelusuri penyebab terjadinya peralatan rusak pada bagian *boiler*. Penelusuran dilakukan berdasarkan data riwayat peralatan rusak yang telah diperoleh sebelumnya. Adapun penyebab masalah peralatan rusak pada bagian *boiler* dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Daftar Nama Peralatan dan Penyebab Masalah Peralatan Rusak Pada *Boiler*

No	Nama Peralatan	Penyebab Masalah
1	<i>Hopper</i>	Masalah pada <i>hammer</i> , terjadi hambatan akibat abu <i>hopper</i> ESP sehingga abu harus dikeluarkan dari <i>emergency drain</i>
2	<i>Conveyor</i>	<i>Scrapper conveyor</i> putus, kemudian dilakukan penggantian <i>pin</i> yang hilang dengan menggunakan baut
3	<i>Coal Feeder</i>	Kebocoran batubara pada <i>flange outlet coal feeder</i> , terjadi penumpukan batubara yang menyebabkan <i>coal feeder</i> tidak bisa beroperasi
4	<i>Furnace</i>	Masalah pada <i>refractory</i> sehingga harus dilakukan <i>patching</i> pada bagian <i>end refractory</i> , <i>outlet limestone</i> dan <i>outlet coal</i> , terjadi masalah pada <i>scaffolding</i>
5	<i>Steam Drum</i>	Masalah pada pipa <i>level transmitter steam drum</i> , pecahnya <i>clading</i> pada <i>steam drum</i>
6	<i>Cyclone Separator</i>	Masalah pada <i>manhole u-beem</i> , sehingga dilakukan <i>visual check</i> di dalam <i>return leg</i> dan hasilnya ditemukan banyak retakan pada <i>refractory</i>
7	<i>Desuperheater</i>	Masalah pada <i>bypass valve desuperheater</i> , <i>outlet valve desuperheater</i> dan <i>control valve desuperheater</i>
8	<i>Economizer</i>	Masalah pada pipa <i>drain ekonomiser</i> menuju <i>periodic blowdown tank</i> yang bocor
9	<i>Downcomer</i>	Masalah pada <i>valve drain downcomer</i>
10	<i>Sootblower</i>	Masalah pada <i>sootblower C30</i> sehingga harus dilakukan penggantian <i>packing</i>
11	<i>Burner</i>	Masalah pada <i>nozzle burner</i> sehingga dilakukan pembersihan dengan udara bertekanan, terdapat <i>crack</i> pada <i>lower burner</i> , kebocoran <i>flange</i> sehingga dilakukan perbaikan dengan cara mengganti <i>packing</i> tali dari <i>flange</i>
12	<i>Slag Cooler</i>	Kebocoran pada jalur pendingin <i>slag cooler</i> , pengegreasan <i>gear slag cooler</i>
13	<i>Induced Draft Fan (ID Fan)</i>	Kebocoran pada <i>oil seal bearing ID fan</i> sisi DE dan NDE, masalah pada <i>manhole</i> dan baut <i>ID fan</i>
14	<i>Primary Air Fan (PA Fan)</i>	Masalah pada <i>bearing</i> dan <i>bearing house</i> , masalah pada <i>damper outlet</i> , masalah <i>valve outlet cooling bearing</i>
15	<i>Secondary Air Fan (SA Fan)</i>	Kebocoran pada <i>sigh glass</i> sisi NDE
16	<i>High Pressure Fluidized Air Fan</i>	Masalah pada <i>manual valve cooling water fan</i>

3.4. Uji Distribusi (*index of fit*) dan Penentuan Parameter (*goodness of fit*)

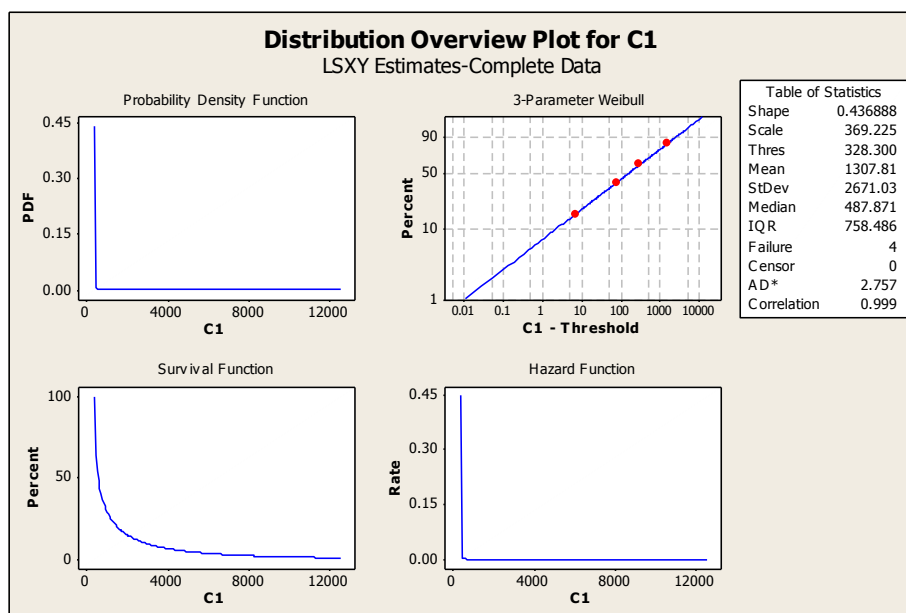
Uji distribusi (*index of fit*) dan penentuan parameter (*goodness of fit*) akan dilakukan pada data waktu antar kerusakan (TTF) dan waktu perbaikan (TTR) aktual setiap peralatan kritis di *boiler* menggunakan bantuan program *Minitab* 16. Uji distribusi akan menggunakan beberapa dugaan distribusi dan distribusi terpilih akan ditentukan menggunakan dua metode penilaian yaitu Anderson Darling (AD) dan Pearson *correlation coefficient*. Sedangkan parameter ditentukan berdasarkan distribusi yang telah terpilih sebelumnya.

Contoh hasil uji distribusi pada data waktu antar kerusakan (TTF) peralatan *cyclone separator boiler* unit 1 menggunakan program *Minitab* 16 dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Uji Distribusi Waktu Antar Kerusakan (TTF) Peralatan *Cyclone Separator Boiler* Unit 1

<i>Distribution</i>	<i>Anderson-Darling (adj)</i>	<i>Correlation Coefficient</i>
<i>Weibull</i>	3,148	0,896
<i>Lognormal</i>	2,861	0,938
<i>Exponential</i>	2,864	*
<i>3-Parameter Weibull</i>	2,757	0,999
<i>Normal</i>	3,042	0,871

Berdasarkan Tabel 2 diperoleh distribusi 3-Parameter *Weibull* sebagai distribusi terpilih dengan nilai Anderson Darling terkecil yaitu 2,757 dan nilai Pearson *correlation coefficient* terbesar yaitu 0,999. Nilai Anderson Darling terkecil dipilih karena pendekatan yang digunakan yaitu *weighted squared distance*. Sedangkan nilai Pearson *correlation coefficient* terbesar dipilih karena pendekatan yang digunakan yaitu *least squares estimates*. Hasil perhitungan parameter berdasarkan distribusinya dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. *Distribution Overview* Waktu Antar Kerusakan (TTF) Peralatan *Cyclone Separator Boiler* Unit 1

Rekapitulasi hasil pengujian distribusi dan parameter waktu antar kerusakan (TTF) dan waktu perbaikan (TTR) pada setiap peralatan kritis di *boiler* menggunakan program *Minitab* 16 dapat dilihat pada Tabel 3 dan Tabel 4.

Tabel 3 Rekapitulasi Uji Distribusi dan Parameter untuk Waktu Antar Kerusakan (TTF)

Boiler	Peralatan	Distribusi	Parameter				
			Weibull			Normal	
			θ	β	γ	μ	Σ
Unit 1	<i>Cyclone Separator</i>	<i>3p-Weibull</i>	369,225	0,43689	328,300		
	<i>Coal Feeder</i>	<i>3p-Weibull</i>	390,156	0,36609	330,634		
	<i>ID Fan</i>	<i>3p-Weibull</i>	263,237	0,28650	333,260		
	<i>PA Fan</i>	<i>3p-Weibull</i>	467,616	0,71195	285,961		
Unit 2	<i>Cyclone Separator</i>	<i>Normal</i>				694,402	364,251
	<i>Coal Feeder</i>	<i>3p-Weibull</i>	338,177	0,66965	321,707		
	<i>ID Fan</i>	<i>3p-Weibull</i>	487,349	0,64880	311,411		
	<i>PA Fan</i>	<i>3p-Weibull</i>	161,367	0,20106	334,064		

Tabel 4. Rekapitulasi Uji Distribusi dan Parameter untuk Waktu Perbaikan (TTR)

Boiler	Peralatan	Distribusi	Parameter		
			Weibull		
			θ	β	γ
Unit 1	<i>Cyclone Separator</i>	<i>3p-Weibull</i>	0,86862	0,39684	1,01595
	<i>Coal Feeder</i>	<i>3p-Weibull</i>	0,96547	1,61950	0,97137
	<i>ID Fan</i>	<i>3p-Weibull</i>	0,73507	0,64297	1,08582
	<i>PA Fan</i>	<i>3p-Weibull</i>	0,81565	1,42279	0,89147
Unit 2	<i>Cyclone Separator</i>	<i>3p-Weibull</i>	0,36030	0,58583	1,11122
	<i>Coal Feeder</i>	<i>3p-Weibull</i>	0,34437	1,17905	1,27532
	<i>ID Fan</i>	<i>3p-Weibull</i>	0,51155	0,62316	1,36482
	<i>PA Fan</i>	<i>3p-Weibull</i>	0,43569	0,85299	1,23573

3.5. Perhitungan Mean Time to Failure (MTTF), Mean Time to Repair (MTTR) dan Keandalan

Setelah parameter-parameter distribusi waktu antar kerusakan (TTF) dan waktu perbaikan (TTR) setiap peralatan kritis diperoleh, maka langkah selanjutnya adalah menentukan nilai rata-rata waktu antar kerusakan atau *mean time to failure* (MTTF), rata-rata waktu perbaikan atau *mean time to repair* (MTTR) dan keandalan aktual pada setiap peralatan bagian boiler.

Adapun contoh perhitungan nilai MTTF peralatan *cyclone separator boiler* unit 1 sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 \text{MTTF} &= \gamma + \theta \cdot \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \\
 &= 328,300 + 369,225 \times \Gamma \left(1 + \frac{1}{0,43689} \right) \\
 &= 328,300 + 369,225 \times \Gamma(3,29) \\
 &= 328,300 + 369,225 \times 1,97565 = 1057,76 \text{ jam}
 \end{aligned}$$

Contoh perhitungan nilai keandalan untuk MTTF peralatan *cyclone separator boiler* unit 1 sebagai berikut.

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\theta}\right)^\beta}$$

$$= \exp\left[-\left(\frac{1057,76 - 328,300}{369,225}\right)^{0,43689}\right] = 0,4218 = 42,18\%$$

Sedangkan contoh perhitungan nilai MTTR peralatan *cyclone separator boiler* unit 1 sebagai berikut.

$$MTTR = \gamma + \theta \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)$$

$$= 1,01595 + 0,86862 \times \Gamma\left(1 + \frac{1}{0,39684}\right)$$

$$= 1,01595 + 0,86862 \times \Gamma(3,52)$$

$$= 1,01595 + 0,86862 \times 2,22297 = 2,95 \text{ jam}$$

Contoh perhitungan nilai keandalan untuk MTTR peralatan *cyclone separator boiler* unit 1 sebagai berikut.

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\theta}\right)^\beta}$$

$$= \exp\left[-\left(\frac{2,95 - 1,01595}{0,86862}\right)^{0,39684}\right] = 0,4139 = 41,39\%$$

Adapun rekapitulasi hasil perhitungan MTTF, MTTR dan keandalan peralatan bagian *boiler* dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Rekapitulasi Hasil Perhitungan MTTF, MTTR dan Keandalan Peralatan Kritis *Boiler*

<i>Boiler</i>	Peralatan	MTTF (Jam)	Keandalan	MTTR (Jam)	Keandalan
Unit 1	<i>Cyclone Separator</i>	1057,76	42,18%	2,95	41,39%
	<i>Coal Feeder</i>	1292,40	40,56%	1,84	23,43%
	<i>ID Fan</i>	1238,91	37,32%	2,11	40,97%
	<i>PA Fan</i>	866,82	41,30%	1,63	27,45%
Unit 2	<i>Cyclone Separator</i>	694,40	50,00%	1,67	40,16%
	<i>Coal Feeder</i>	805,17	38,39%	1,60	32,79%
	<i>ID Fan</i>	978,00	41,17%	2,10	41,03%
	<i>PA Fan</i>	1260,74	31,52%	1,71	39,66%

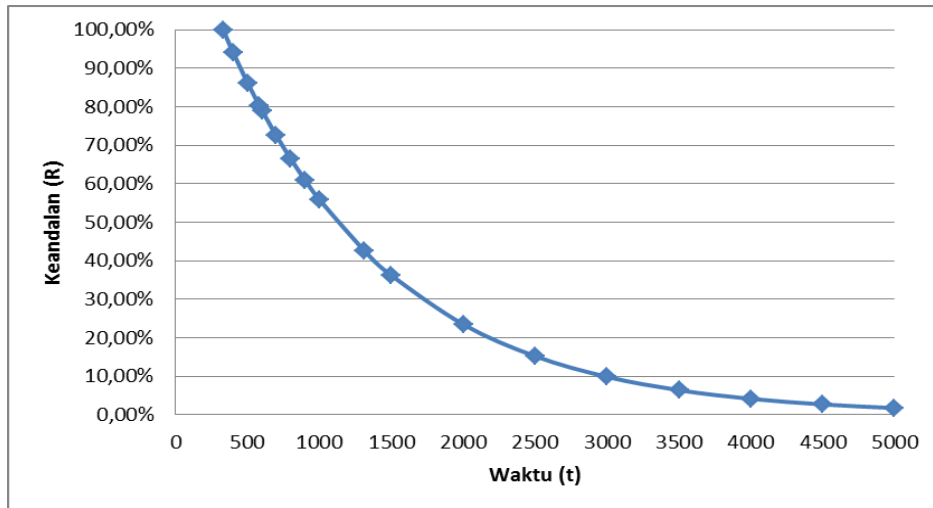
Berdasarkan tabel 5, keandalan aktual delapan peralatan kritis bagian *boiler* yaitu berada pada 23% hingga 50%. Keandalan tersebut masih jauh dari harapan yaitu sebesar 80%. Maka dari itu perlu dilakukan peningkatan nilai keandalan agar kinerja bagian *boiler* semakin meningkat.

3.6. Usulan Waktu Perawatan dan Perbaikan

Setelah diketahui tingkat keandalan pada setiap peralatan kritis *boiler*, kemudian akan diusulkan waktu perawatan dan perbaikan. Adapun tingkat keandalan yang ingin dicapai yaitu sebesar 80%. Agar nilai keandalan naik, maka akan diterapkan tindakan *preventive maintenance*, di mana perawatan dilakukan sebelum terjadinya gangguan atau kerusakan pada setiap peralatan. Kegiatan *preventive maintenance* sangat disarankan agar dapat mencegah terjadinya *blackout* secara sistem serta mengurangi kondisi *wear out* pada setiap peralatan.

Adapun contoh untuk peralatan *cyclone separator boiler* unit 1, bahwa telah diketahui tingkat keandalan aktual untuk waktu antar kerusakan (MTTF) sebesar 42,18% dengan selang waktu perawatan selama 1057,76 jam. Serta telah diketahui tingkat keandalan aktual untuk waktu perbaikan (MTTR) sebesar 41,39% dengan selang waktu perbaikan selama 2,95 jam. Untuk mendapatkan tingkat keandalan yang diinginkan yaitu sebesar 80%, maka akan dilakukan simulasi waktu perawatan dan perbaikan.

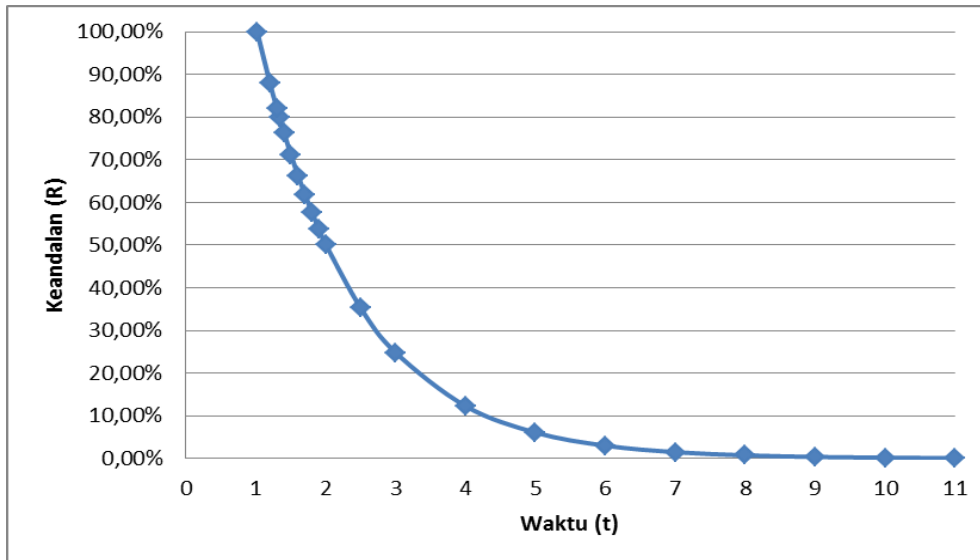
Berikut ini merupakan gambar simulasi waktu perawatan (MTTF) hingga 5000 jam operasi kerja pada setiap waktu (t) untuk melihat penurunan nilai keandalan (dari lakukannya tindakan *preventive maintenance* hingga tidak dilakukannya tindakan *preventive maintenance*) dari peralatan *cyclone separator boiler* unit 1.



Gambar 5. Simulasi untuk Selang Waktu Perawatan pada Peralatan *Cyclone Separator Boiler* Unit 1

Gambar 5 menunjukkan bahwa nilai keandalan untuk waktu perawatan pada peralatan *cyclone separator boiler* unit 1 akan meningkat apabila waktu perawatan dilakukan sebelum terjadinya gangguan atau kerusakan (*preventive maintenance*). Berdasarkan simulasi yang telah dilakukan, diperoleh selang waktu perawatan selama 585 jam untuk mencapai nilai keandalan sebesar 80 % pada peralatan *cyclone separator boiler* unit 1.

Berikut ini merupakan gambar simulasi waktu perbaikan (MTTR) hingga 15 jam perbaikan pada setiap waktu (t) untuk melihat penurunan nilai keandalan dari peralatan *cyclone separator boiler* unit 1.



Gambar 6. Simulasi untuk Waktu Perbaikan pada Peralatan *Cyclone Separator Boiler* Unit 1

Berdasarkan simulasi yang telah dilakukan, diperoleh waktu perbaikan selama 1,333 jam untuk mencapai nilai keandalan sebesar 80 % pada peralatan *cyclone separator boiler* unit 1.

Adapun rekapitulasi usulan waktu perawatan dan perbaikan beserta keandalannya pada setiap peralatan kritis bagian *boiler*, dapat dilihat pada tabel 6.

Tabel 6. Usulan Waktu Perawatan dan Perbaikan pada Setiap Peralatan Kritis Bagian *Boiler*

<i>Boiler</i>	Peralatan	MTTF (Jam)	Keandalan	MTTR (Jam)	Keandalan
Unit 1	<i>Cyclone Separator</i>	585	80,03%	1,333	80,02%
	<i>Coal Feeder</i>	528	80,02%	1,090	80,13%
	<i>ID Fan</i>	478	80,11%	1,355	80,08%
	<i>PA Fan</i>	421	80,06%	1,036	80,01%
Unit 2	<i>Cyclone Separator</i>	67	80,01%	1,220	80,12%
	<i>Coal Feeder</i>	416	80,09%	1,363	80,25%
	<i>ID Fan</i>	453	80,04%	1,497	80,12%
	<i>PA Fan</i>	427	80,05%	1,322	80,11%

4. KESIMPULAN

Waktu usulan perawatan dan perbaikan yang ingin dicapai dalam penelitian ini yaitu untuk memenuhi nilai keandalan sebesar 80% di mana sesuai dengan rekomendasi *Reliability Standard Power Plant*. Untuk memenuhi keandalan 80%, maka diterapkan tindakan *preventive maintenance* pada setiap komponen kritis bagian *boiler*. Adapun hasil penelitian diperoleh waktu perawatan yang diusulkan yaitu berada pada 67 jam hingga 585 jam untuk mencapai nilai keandalan sebesar 80% pada delapan komponen kritis bagian *boiler*. Sedangkan waktu perbaikan yang diusulkan yaitu berada pada 1,036 jam hingga 1,497 jam untuk mencapai nilai keandalan sebesar 80% pada delapan komponen kritis bagian *boiler*.

5. SARAN

Pada penelitian selanjutnya, agar dapat menambahkan variabel biaya untuk memperoleh keandalan yang optimal serta menggunakan algoritma sehingga dapat memprediksi kapan kerusakan akan terjadi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Putri E. L., Bahauddin, A., Ferdinant, P. F., 2013, Usulan Jadwal Perawatan pada Mesin Electric Arc Furnace 5 dengan Simulasi Monte Carlo, *Jurnal Teknik Industri*, vol 1, no 4, hal 352-257.
- [2] Pamungkas, I., Arhami., Dirhamsyah, M., 2019, Monte Carlo simulation for predicting the reliability of a boiler in the Nagan Raya steam power plant. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol 523, No 1, hal 012071.
- [3] Soesetyo, I., Bendatu, L. Y., 2014, Penjadwalan Predictive Maintenance dan Biaya Perawatan Mesin Pellet di PT Charoen Pokphand Indonesia-Sepanjang, *Jurnal Tirta*, vol 2, no 2, hal 147-154.
- [4] S. H. Eko, S. H., dan B. Untung, B., 2008, Analisa Keandalan Sistem Bahan Bakar Motor Induk Pada Kapal Motor Leuser, *Jurnal Kapal*, vol 5, no 4, hal 123-135.
- [5] Ebeling, E. C., 1997, *An Introduction To Reliability And Maintainability Engineering*, International Ed. Singapore: McGraw Hill, 1997.
- [6] Pamungkas, I., 2019, Penentuan Tingkat Risiko dan Keandalan pada Boiler di Industri Pembangkit Listrik Nagan Raya, *ETD Unsyiah*.