

SIMULASI MONTE CARLO UNTUK MENENTUKAN KEANDALAN PADA BAGIAN BOILER DI PEMBANGKIT LISTRIK BERBASIS BATUBARA

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

Abstrak

PT. PLN (Persero) saat ini menggunakan banyak pembangkit listrik berbasis batubara atau Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) dalam menjalankan kegiatan operasionalnya. Provinsi Aceh terdapat salah satu PLTU yang terletak di Kabupaten Nagan Raya dan dimiliki oleh PT. PLN (Persero). PLTU Nagan Raya memiliki dua unit pembangkit dengan kapasitas terpasang sebesar 2x110 Megawatt. Frekuensi gangguan atau kerusakan tertinggi dialami oleh bagian *boiler* dan hal ini sangat berpengaruh terhadap sistem produksi PLTU Nagan Raya. Evaluasi kinerja dari segi keandalan sangat diperlukan untuk meminimalisir gangguan atau kerusakan tersebut. Tujuan penelitian ini adalah menentukan tingkat keandalan menggunakan simulasi Monte Carlo pada setiap komponen kritis bagian *boiler*. Simulasi Monte Carlo akan digunakan untuk memprediksi waktu antar kerusakan atau *time to failure* (TTF) dan waktu perbaikan atau *time to repair* (TTR) sehingga dapat diprediksi tingkat keandalannya dimasa depan. Simulasi Monte Carlo pada dasarnya membangkitkan bilangan acak berdistribusi *uniform* (0,1) dan kemudian dikonversi ke distribusi *non-uniform* menggunakan metode transformasi invers. Hasil simulasi Monte Carlo pada delapan komponen kritis bagian *boiler* diperoleh diperoleh selang waktu perawatan (TTF) berada pada 260 jam hingga 1312 jam dengan nilai keandalan berada pada 30% hingga 42%. Sedangkan perolehan waktu perbaikan (TTR) berada pada 1,57 jam hingga 2,26 jam dengan nilai keandalan berada pada 22% hingga 41%.

Kata kunci: Boiler, Keandalan, Simulasi Monte Carlo

Abstract

PT. PLN (Persero) currently uses a lot of coal-based power plants or Steam Power Plants (PLTU) in carrying out its operational activities. Aceh Province has a PLTU located in Nagan Raya Regency and is owned by PT. PLN (Persero). The Nagan Raya power plant has two generating units with an installed capacity of 2x110 Megawatts. The highest frequency of interference or damage experienced by the boiler section and this is very influential on the Nagan Raya PLTU production system. Performance evaluation in terms of reliability is needed to minimize interference or damage. The purpose of this study is to determine the level of reliability using Monte Carlo simulations on each important component of the boiler section. Monte Carlo simulations will be used to predict the time between failure or time to failure (TTF) and time to repair (TTR) so that the level of reliability can be predicted in the future. Monte Carlo simulations basically produce uniformly distributed random numbers (0.1) and then convert them into non-uniform distributions using the inverse transformation method. Monte Carlo simulation results on eight critical components in the boiler section obtained time to failure (TTF) obtained were 260 hours to 1312 hours with a reliability value of 30% to 42%. While the time to repair (TTR) is 1,57 hours to 2,26 hours with a reliability value of 22% to 41%.

Keywords: Boiler, Reliability, Monte Carlo Simulation

1. PENDAHULUAN

Industri energi listrik memiliki peran penting seiring dengan semakin meningkatnya konsumsi listrik. Industri energi listrik yang memadai sangat dibutuhkan untuk mengimbangi pertumbuhan penduduk dan ekonomi yang sangat signifikan. Kehidupan modern yang berlandaskan penggunaan teknologi turut berpengaruh terhadap meningkatnya konsumsi energi listrik. Peran signifikan tersebut

hingga saat ini tidak mampu diimbangi oleh industri energi listrik khususnya di Indonesia. PT. PLN (Persero) sebagai pengelola industri energi listrik di Indonesia yang dimiliki pemerintah Indonesia dituntut harus mampu memenuhi kebutuhan listrik yang semakin meningkat setiap tahunnya.

PT. PLN (Persero) saat ini menggunakan banyak pembangkit listrik berbasis batubara atau Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) dalam menjalankan kegiatan operasionalnya. Pembangkit listrik berbasis batubara memiliki keunggulan seperti pembangkitnya mampu dimaksimalkan hingga berkapasitas besar, serta terjangkau biaya produksinya karena batubara banyak tersedia dan harganya saat ini relatif terjangkau jika di bandingkan dengan harga komoditas lainnya. Provinsi Aceh terdapat salah satu pembangkit listrik berbasis batubara atau Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) yang terletak di Kabupaten Nagan Raya dan dimiliki oleh PT. PLN (Persero). PLTU Nagan Raya memiliki dua unit pembangkit dengan kapasitas terpasang sebesar 2x110 Megawatt dan mendistribusikan sebagian besar listriknya di wilayah Aceh dan Sumatera Utara. Namun gangguan dan kerusakan tidak dapat dihindari sehingga berpengaruh terhadap sistem kelistrikan secara keseluruhan.

PLTU Nagan Raya 2x110 Megawatt memiliki tiga bagian utama dalam sistem produksinya yaitu bagian *boiler*, *turbine* dan *generator*. Frekuensi gangguan atau kerusakan tertinggi dialami oleh bagian *boiler* dan hal ini sangat berpengaruh terhadap sistem produksi PLTU Nagan Raya. *Boiler* berfungsi sebagai alat penghasil uap panas berkompresi tinggi hasil dari pembakaran batubara. Uap panas tersebut kemudian digunakan untuk menggerakkan *turbine* sehingga secara sistem akan menghasilkan listrik. PLTU Nagan Raya mengadopsi *boiler circulating fluidizing bed* (CFB) dimana *boiler* ini memiliki beberapa peralatan yang saling berkaitan antara satu dengan yang lainnya. Kegiatan perawatan korektif dan perawatan keseluruhan (*overhaul*) yang hanya dilakukan selama enam bulan sekali menjadi penyebab sering terjadinya gangguan atau kerusakan. Evaluasi kinerja dari segi keandalan (*reliability*) sangat diperlukan untuk meminimalisir gangguan atau kerusakan tersebut.

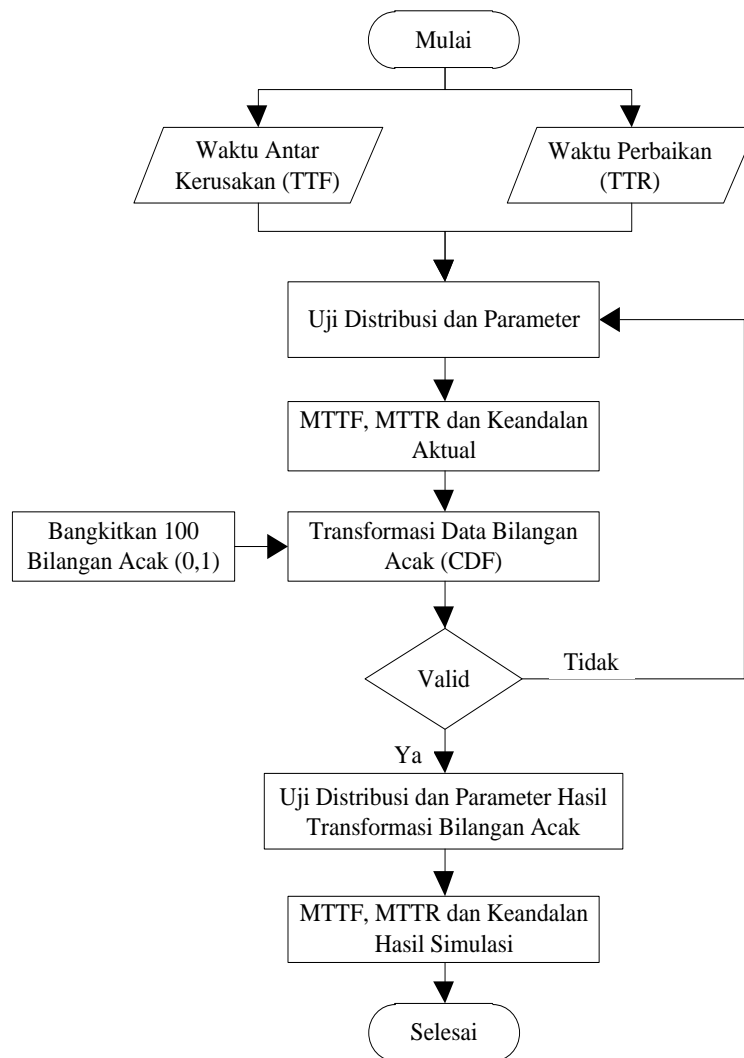
Keandalan merupakan salah satu ukuran keberhasilan sistem perawatan sehingga nilai keandalan sangat bergantung pada sistem perawatan yang diterapkan oleh perusahaan. Simulasi Monte Carlo akan digunakan untuk memprediksi waktu antar kerusakan atau *time to failure* (TTF) dan waktu perbaikan atau *time to repair* (TTR) sehingga dapat diprediksi tingkat keandalannya dimasa depan. Simulasi Monte Carlo pada dasarnya membangkitkan bilangan acak berdistribusi *uniform* (0,1) dan kemudian dikonversi ke distribusi *non-uniform* menggunakan metode transformasi invers. Keunggulan simulasi Monte Carlo yaitu mudah diaplikasikan dan hasil mendekati nilai aktual. Adapun beberapa penelitian terdahulu yang berkaitan dengan penelitian ini seperti mengusulkan waktu perawatan dengan menggunakan simulasi monte carlo berdasarkan nilai keandalan [1-3]

Adapun tujuan penelitian ini adalah menentukan tingkat keandalan menggunakan simulasi monte carlo pada setiap komponen kritis bagian *boiler*.

2. METODE PENELITIAN

2.1. *Flowchart* Simulasi Monte Carlo untuk Keandalan

Adapun *flowchart* pelaksanaan simulasi Monte Carlo untuk keandalan dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Flowchart Simulasi Monte Carlo untuk Keandalan

2.2. Rancangan Penelitian

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

Peralatan kritis yang dimaksud adalah peralatan pada bagian *boiler* yang mengalami gangguan atau kerusakan berdasarkan riwayat data kerusakan. Kemudian 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 tertinggi 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 data waktu antar kerusakan (TTF) dan waktu perbaikan (TTR) aktual dari peralatan kritis *boiler*. Beberapa dugaan distribusi antara lain distribusi *Normal*, *Lognormal*, *Weibull* dan *Exponential*. Distribusi terpilih akan menggunakan dua pendekatan yaitu Anderson Darling (AD) dan Pearson *correlation coefficient*. Anderson Darling menggunakan pendekatan *weighted squared distance* yaitu berdasarkan nilai Anderson Darling terkecil. Sedangkan nilai Pearson *correlation coefficient* menggunakan pendekatan *least squares estimates* yaitu berdasarkan nilai *correlation coefficient* terbesar. Parameter kemudian 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

Perhitungan MTTF, MTTR dan keandalan memerlukan nilai parameter yang telah diketahui. Setiap perhitungan akan berbeda berdasarkan parameter yang sesuai dengan distribusi data yang ada. Beberapa persamaan tersebut yaitu [4]:

1. Distribusi *Weibull* menggunakan parameter 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* menggunakan parameter 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)

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

- b. Fungsi keandalan

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

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

3. Distribusi *Normal* menggunakan parameter 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* menggunakan parameter 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. Membangkitkan Bilangan Acak dan Transformasi Data Bilangan Acak

Membangkitkan bilangan acak (*random number*) merupakan unsur dasar yang dibutuhkan dalam melakukan simulasi Monte Carlo. Bilangan acak yang digunakan adalah berdistribusi *uniform* (0,1) dan kemudian harus dikonversi terlebih dahulu ke distribusi *non-uniform* dengan metode transformasi invers menggunakan *cumulative distribution function* [5]. Pembangkitan bilangan acak akan menggunakan program *Microsoft Excel* dengan fungsi =RAND(). Sedangkan untuk proses

transformasi invers akan menggunakan beberapa persamaan *cumulative distribution function* sesuai dengan distribusi yang terpilih antara lain sebagai berikut [4]:

1. Distribusi *Weibull* dengan parameter yang digunakan yaitu θ (parameter skala), β (parameter bentuk), γ (parameter lokasi). Persamaan distribusi *weibull* adalah:

$$t = \gamma + \theta(-\ln(U))^{\frac{1}{\beta}} \quad (9)$$

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

$$t = e^{\varphi(U).s + \frac{t_{med}}{s}} \quad (10)$$

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

$$t = \varphi(U).\sigma + \frac{\mu}{\sigma} \quad (11)$$

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

$$t = -\frac{1}{\lambda} \ln(U) \quad (12)$$

2.2.5. Uji Validitas

Uji validitas ialah suatu ukuran yang mengacu kepada derajat kesesuaian antara data yang dikumpulkan dan data dalam sumber sebenarnya [6]. Uji validitas dalam penelitian ini yaitu untuk melihat apakah data waktu hasil transformasi bilangan acak pada setiap peralatan kritis pada *boiler* sudah mewakili waktu aktual yang ada. Uji validitas akan dilakukan menggunakan metode Mann-Withney U dengan bantuan program SPSS 18.

2.2.6. Melakukan Uji Distribusi (*index of fit*) dan Menentukan Parameter (*goodness of fit*) Data Waktu Hasil Transformasi Bilangan Acak

Uji distribusi (*index of fit*) dan penentuan parameter (*goodness of fit*) akan dilakukan pada data waktu hasil transformasi bilangan acak setiap peralatan kritis di *boiler* menggunakan bantuan program *Minitab* 16. Parameter yang diperoleh kemudian akan digunakan untuk proses berikutnya.

2.2.7. Menghitung *Mean Time to Failure* (MTTF), *Mean Time to Repair* (MTTR) dan Keandalan Hasil Simulasi

Perhitungan MTTF, MTTR dan keandalan hasil simulasi memerlukan nilai parameter yang telah dihitung sebelumnya. Setiap perhitungan akan berbeda berdasarkan parameter yang sesuai dengan distribusi data yang ada. Perhitungan MTTF, MTTR dan keandalan hasil simulasi akan menggunakan persamaan yang sama seperti pada perhitungan MTTF, MTTR dan keandalan aktual.

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 metode pengumpulan data yang digunakan dalam penelitian ini antara lain:

1. Wawancara secara individual dengan pihak perusahaan, terutama pada bagian pemeliharaan atau perawatan (*maintenance*).

2. Dokumentasi dengan mengumpulkan data hasil dokumentasi perusahaan yang berhubungan dengan penelitian berupa data riwayat kegiatan perawatan berdasarkan peralatan yang mengalami kerusakan pada bagian *boiler*.
3. Observasi dengan melakukan pengamatan secara langsung pada setiap kegiatan pemeliharaan atau perawatan terutama bagian *boiler*.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Spesifikasi dan Cara Kerja *Boiler*

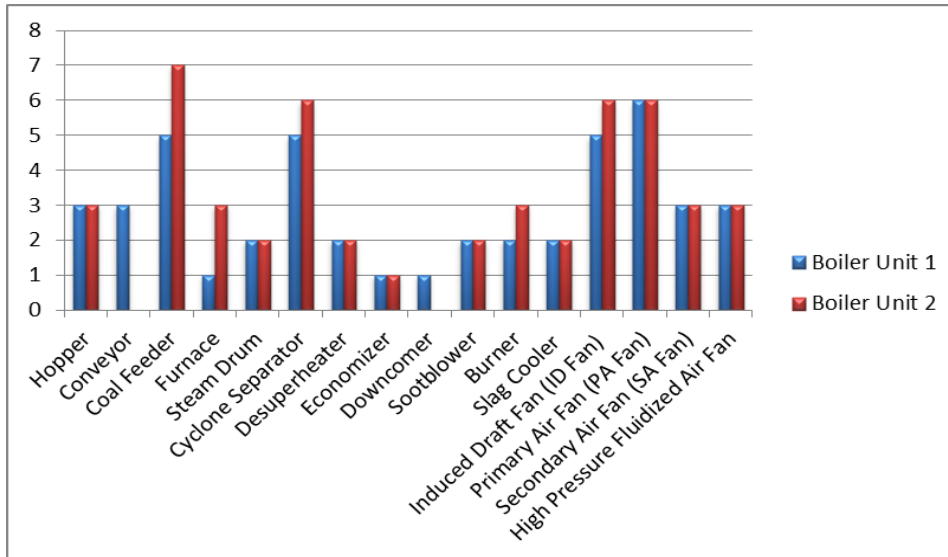
Boiler merupakan alat penghasil uap panas bertekanan tinggi hasil dari pembakaran batubara dan kemudian akan digunakan untuk menggerakkan *turbine* sehingga menghasilkan listrik. PLTU Nagan Raya 2x110 megawatt menggunakan *boiler* dengan spesifikasi teknis sebagai berikut:

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 2.



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

Berdasarkan Gambar 2 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. Uji Distribusi (*index of fit*) dan Penentuan Parameter (*goodness of fit*)

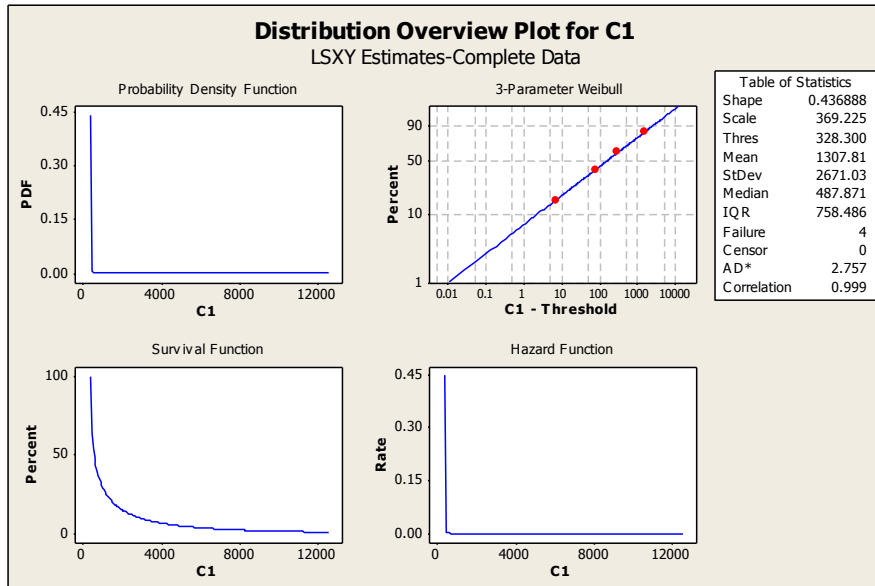
Uji distribusi (*index of fit*) dan penentuan parameter (*goodness of fit*) akan dilakukan pada data waktu antar kerusakan (TTF) dan waktu perbaikan (TTR) aktual setiap peralatan kritis di *boiler* menggunakan bantuan program *Minitab* 16. Uji distribusi akan menggunakan beberapa dugaan distribusi dan 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 1.

Tabel 1. 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 1 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 3.



Gambar 3. *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 2 dan Tabel 3.

Tabel 2. 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 3. 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

3.4. 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.

$$\begin{aligned} R(t) &= e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\theta}\right)^\beta} \\ &= \exp \left[-\left(\frac{1057,76 - 328,300}{369,225}\right)^{0,43689} \right] = 0,4218 = 42,18\% \end{aligned}$$

Adapun rekapitulasi hasil perhitungan MTTF, MTTR dan keandalan peralatan bagian *boiler* dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. 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 4, keandalan aktual delapan peralatan kritis bagian *boiler* yaitu berada pada 23% hingga 50%.

3.5. Pembangkitkan Bilangan Acak dan Transformasi Data Bilangan Acak

Pembangkitan bilangan acak (*random number*) bertujuan untuk menghasilkan nilai-nilai yang mempunyai distribusi setara dengan populasi data waktu antar kerusakan (TTF) dan waktu perbaikan (TTR) pada peralatan kritis *boiler* yang sebenarnya. Unsur dasar dalam pembangkitan *random number* adalah data berdistribusi *uniform* (0,1) yang dibangkitkan dengan menggunakan *software Microsoft Excel* dengan fungsi =RAND(). Pada penelitian ini akan dibangkitkan seratus bilangan acak yang akan mewakili setiap peralatan kritis pada *boiler*. Hasil pembangkitan seratus bilangan acak untuk waktu antar kerusakan (TTF) pada delapan peralatan kritis *boiler* dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil Pembangkitan Bilangan Acak untuk Waktu Antar Kerusakan (TTF)

No	Boiler Unit 1				Boiler Unit 2			
	<i>Cyclone Separator</i>	<i>Coal Feeder</i>	<i>ID Fan</i>	<i>PA Fan</i>	<i>Cyclone Separator</i>	<i>Coal Feeder</i>	<i>ID Fan</i>	<i>PA Fan</i>
1	0,4546	0,2041	0,1394	0,1239	0,3293	0,6164	0,8337	0,3797
2	0,5457	0,7368	0,1236	0,3452	0,2169	0,7193	0,9016	0,1754
3	0,4507	0,9782	0,7844	0,0583	0,5950	0,3789	0,4910	0,9439
4	0,9197	0,9278	0,0328	0,6031	0,5808	0,6674	0,8443	0,3829
5	0,4507	0,0200	0,6592	0,8844	0,6176	0,9043	0,6590	0,7128
6	0,9214	0,5228	0,7031	0,6986	0,6382	0,1242	0,8215	0,4529
7	0,1061	0,1182	0,2747	0,8442	0,4091	0,8711	0,3143	0,3332
..
..
98	0,1216	0,4366	0,0442	0,4639	0,0697	0,4577	0,2530	0,2018
99	0,0641	0,6248	0,2898	0,9179	0,4050	0,0920	0,7956	0,3117
100	0,1347	0,5631	0,9671	0,8228	0,9102	0,5918	0,0752	0,2344

Kemudian data bilangan acak yang dibangkitkan harus dikonversi ke distribusi non-*uniform* dengan metode transformasi invers. Transformasi invers (*t*) dilakukan menggunakan fungsi distribusi kumulatif (*cummulative distribution function*). Adapun berdasarkan hasil pengujian distribusi yang telah dilakukan sebelumnya, hanya dua distribusi yang akan digunakan yaitu distribusi *Normal* dan *Weibull*. Proses tranformasi data bilangan acak distribusi *Weibull* akan menggunakan persamaan 9 dan distribusi *Normal* akan menggunakan persamaan 11. Hasil transformasi bilangan acak untuk waktu antar kerusakan (TTF) pada peralatan kritis *boiler* dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6. Hasil Transformasi Bilangan Acak untuk Waktu Antar Kerusakan (TTF)

No	Boiler Unit 1				Boiler Unit 2			
	<i>Cyclone Separator</i>	<i>Coal Feeder</i>	<i>ID Fan</i>	<i>PA Fan</i>	<i>Cyclone Separator</i>	<i>Coal Feeder</i>	<i>ID Fan</i>	<i>PA Fan</i>
1	542,51	1713,58	3140,74	1601,56	159,03	436,07	346,63	471,63
2	445,48	345,92	3788,61	795,85	283,20	386,12	326,20	2875,46
3	547,97	330,65	335,14	2314,82	89,51	645,14	599,71	334,06
4	329,56	330,96	19548,45	465,45	76,21	409,19	342,94	465,75
5	547,91	16546,81	345,66	310,55	110,87	332,66	437,98	334,80
6	329,50	450,16	340,16	396,75	130,75	1335,74	351,13	384,71
7	2675,15	3428,24	977,10	324,56	81,81	339,26	921,87	591,97
..
..
98	2361,85	564,26	14285,90	608,74	536,58	555,76	1106,97	2008,83
99	4058,18	380,34	888,66	300,78	85,69	1560,52	361,56	679,86
100	2141,74	416,39	333,26	333,03	490,76	450,73	2421,77	1360,42

3.6. Uji Validitas

Uji validitas akan dilakukan pada nilai data waktu aktual dengan nilai hasil transformasi bilangan acak pada setiap peralatan kritis di *boiler*. Uji validitas akan menggunakan metode Mann-Whitney U dengan bantuan program SPSS 18. Adapun rumusan hipotesa yang digunakan yaitu sebagai berikut:

H₀: Nilai data waktu aktual peralatan kritis tidak berbeda signifikan dengan nilai hasil transformasi bilangan acak.

H₁: Nilai data waktu aktual peralatan kritis berbeda signifikan dengan nilai hasil transformasi bilangan acak.

- Taraf signifikan (α) yang digunakan adalah 5% atau 0,05
- Kriteria pengujian:
H₀ diterima apabila nilai probabilitas $> \alpha$ (0,05)
H₀ ditolak apabila nilai probabilitas $< \alpha$ (0,05)

Hasil uji validitas pada data waktu antar kerusakan (TTF) aktual dengan waktu antar kerusakan (TTF) hasil transformasi bilangan acak peralatan *coal feeder boiler* unit 1 menggunakan program SPSS 18 dapat dilihat pada Tabel 7.

Tabel 7. Uji Validitas Waktu Antar Kerusakan (TTF) Aktual dengan Hasil Transformasi Bilangan Acak pada Peralatan *Cyclone Separator Boiler* Unit 1

	TTF Coal Feeder Boiler Unit 1
Mann-Whitney U	189.000
Wilcoxon W	5239.000
Z	-.186
Asymp. Sig. (2-tailed)	.852
Exact Sig. [2*(1-tailed Sig.)]	.864 ^a

Berdasarkan Tabel 7 diperoleh nilai *Asymp. Sig. (2-tailed)* = 0,852 lebih besar dari 0,05, maka disimpulkan bahwa H₀ diterima dan dinyatakan *valid*. Adapun rekapitulasi uji validitas dapat dilihat pada Tabel 8 dan Tabel 9.

Tabel 8. Rekapitulasi Uji Validitas Waktu Antar Kerusakan (TTF) Aktual dengan Hasil Transformasi Bilangan Acak

Boiler	Peralatan	Asymp. Sig. (2-tailed)	α	Keterangan
Unit 1	<i>Cyclone Separator</i>	0,636	0,05	H ₀ diterima
	<i>Coal Feeder</i>	0,852	0,05	H ₀ diterima
	<i>ID Fan</i>	0,926	0,05	H ₀ diterima
	<i>PA Fan</i>	0,833	0,05	H ₀ diterima
Unit 2	<i>Cyclone Separator</i>	0,053	0,05	H ₀ diterima
	<i>Coal Feeder</i>	0,733	0,05	H ₀ diterima
	<i>ID Fan</i>	0,821	0,05	H ₀ diterima
	<i>PA Fan</i>	0,746	0,05	H ₀ diterima

Tabel 9. Rekapitulasi Uji Validitas Waktu Perbaikan (TTR) Aktual dengan Hasil Transformasi Bilangan Acak

Boiler	Peralatan	Asymp. Sig. (2-tailed)	α	Keterangan
Unit 1	<i>Cyclone Separator</i>	0,728	0,05	H ₀ diterima
	<i>Coal Feeder</i>	0,839	0,05	H ₀ diterima
	<i>ID Fan</i>	0,827	0,05	H ₀ diterima
	<i>PA Fan</i>	0,859	0,05	H ₀ diterima
Unit 2	<i>Cyclone Separator</i>	0,774	0,05	H ₀ diterima
	<i>Coal Feeder</i>	0,627	0,05	H ₀ diterima
	<i>ID Fan</i>	0,821	0,05	H ₀ diterima
	<i>PA Fan</i>	0,743	0,05	H ₀ diterima

3.7. Uji Distribusi (*index of fit*) dan Parameter (*goodness of fit*) Hasil Transformasi Bilangan Acak
 Rekapitulasi hasil pengujian distribusi dan parameter waktu antar kerusakan (TTF) dan waktu perbaikan (TTR) hasil transformasi bilangan acak pada setiap peralatan kritis di *boiler* menggunakan program *Minitab* 16 dapat dilihat pada Tabel 10 dan Tabel 11.

Tabel 10. Rekapitulasi Uji Distribusi dan Parameter untuk Waktu Antar Kerusakan (TTF) Hasil Transformasi Data Bilangan Acak

Boiler	Peralatan	Distribusi	Parameter		
			Weibull		
			θ	β	γ
Unit 1	<i>Cyclone Separator</i>	<i>3p-Weibull</i>	534.522	0.46379	328.277
	<i>Coal Feeder</i>	<i>3p-Weibull</i>	312.062	0.35240	330.635
	<i>ID Fan</i>	<i>3p-Weibull</i>	183.191	0.28076	333.260
	<i>PA Fan</i>	<i>3p-Weibull</i>	385.854	0.63506	285.907
Unit 2	<i>Cyclone Separator</i>	<i>3p-Weibull</i>	255.819	1.14558	17.192
	<i>Coal Feeder</i>	<i>3p-Weibull</i>	286.518	0.67362	321.545
	<i>ID Fan</i>	<i>3p-Weibull</i>	414.357	0.65084	311.215
	<i>PA Fan</i>	<i>3p-Weibull</i>	78.477	0.18787	334.064

Tabel 11. Rekapitulasi Uji Distribusi dan Parameter untuk Waktu Perbaikan (TTR) Hasil Transformasi Data Bilangan Acak

Boiler	Peralatan	Distribusi	Parameter		
			Weibull		
			θ	β	γ
Unit 1	<i>Cyclone Separator</i>	<i>3p-Weibull</i>	0.58558	0.41199	1.01618
	<i>Coal Feeder</i>	<i>3p-Weibull</i>	0.89136	1.65851	0.97094
	<i>ID Fan</i>	<i>3p-Weibull</i>	0.63893	0.52719	1.08582
	<i>PA Fan</i>	<i>3p-Weibull</i>	0.71357	1.37546	0.92031
Unit 2	<i>Cyclone Separator</i>	<i>3p-Weibull</i>	0.29104	0.59314	1.11123
	<i>Coal Feeder</i>	<i>3p-Weibull</i>	0.27787	0.90809	1.29569
	<i>ID Fan</i>	<i>3p-Weibull</i>	0.43436	0.73777	1.36652
	<i>PA Fan</i>	<i>3p-Weibull</i>	0.36119	0.91751	1.23469

3.8. Perhitungan *Mean Time to Failure* (MTTF), *Mean Time to Repair* (MTTR) dan Keandalan Hasil Simulasi

Setelah parameter-parameter distribusi waktu antar kerusakan (TTF) dan waktu perbaikan (TTR) hasil transformasi data bilangan acak pada 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 hasil simulasi pada setiap peralatan bagian *boiler*. Adapun rekapitulasi hasil perhitungan MTTF, MTTR dan keandalan hasil simulasi pada peralatan bagian *boiler* dapat dilihat pada Tabel 12.

Tabel 12. Rekapitulasi Hasil Perhitungan MTTF, MTTR dan Keandalan Hasil Simulasi

Boiler	Peralatan	MTTF (Jam)	Keandalan	MTTR (Jam)	Keandalan
Unit 1	<i>Cyclone Separator</i>	1312.85	42.56%	2.26	41.72%
	<i>Coal Feeder</i>	1139.38	40.12%	1.77	22.72%
	<i>ID Fan</i>	981.76	37.01%	2.25	38.16%
	<i>PA Fan</i>	825.36	41.15%	1.57	28.42%
Unit 2	<i>Cyclone Separator</i>	260.69	33.61%	1.56	40.29%
	<i>Coal Feeder</i>	697.14	41.35%	1.59	38.66%
	<i>ID Fan</i>	877.97	41.06%	1.89	40.94%
	<i>PA Fan</i>	832.19	30.35%	1.61	38.46%

3.9. Evaluasi Hasil

Evaluasi hasil dilakukan untuk melihat nilai *mean time to failure* (MTTF), *mean time to repair* (MTTR) dan keandalan aktual dengan hasil simulasi Monte Carlo. Simulasi Monte Carlo dilakukan untuk memprediksi waktu antar kerusakan, waktu perbaikan dan nilai keandalan dimasa depan. Adapun hasil perbandingan nilai MTTF, MTTR dan keandalan aktual dengan hasil simulasi Monte Carlo dapat dilihat pada Tabel 13 dan Tabel 14.

Tabel 13. Rekapitulasi Perbandingan Hasil MTTF dan Keandalan Aktual dan Simulasi Monte Carlo

Boiler	Peralatan	Aktual		Simulasi	
		MTTF (jam)	Keandalan	MTTF (jam)	Keandalan
Unit 1	<i>Cyclone Separator</i>	1057,76	42,18%	1312.85	42.56%
	<i>Coal Feeder</i>	1292,40	40,56%	1139.38	40.12%
	<i>ID Fan</i>	1238,91	37,32%	981.76	37.01%
	<i>PA Fan</i>	866,82	41,30%	825.36	41.15%
Unit 2	<i>Cyclone Separator</i>	694,40	50,00%	260.69	33.61%
	<i>Coal Feeder</i>	805,17	38,39%	697.14	41.35%
	<i>ID Fan</i>	978,00	41,17%	877.97	41.06%
	<i>PA Fan</i>	1260,74	31,52%	832.19	30.35%

Tabel 14. Rekapitulasi Perbandingan Hasil MTTR dan Keandalan Aktual dan Simulasi Monte Carlo

Boiler	Peralatan	Aktual		Simulasi	
		MTTR (jam)	Keandalan	MTTR (jam)	Keandalan
Unit 1	<i>Cyclone Separator</i>	2,95	41,39%	2.26	41.72%
	<i>Coal Feeder</i>	1,84	23,43%	1.77	22.72%
	<i>ID Fan</i>	2,11	40,97%	2.25	38.16%
	<i>PA Fan</i>	1,63	27,45%	1.57	28.42%
Unit 2	<i>Cyclone Separator</i>	1,67	40,16%	1.56	40.29%
	<i>Coal Feeder</i>	1,60	32,79%	1.59	38.66%
	<i>ID Fan</i>	2,10	41,03%	1.89	40.94%
	<i>PA Fan</i>	1,71	39,66%	1.61	38.46%

Berdasarkan Tabel 13 hasil perhitungan *mean time to failure* (MTTF) aktual pada delapan peralatan boiler, diketahui bahwa selang waktu perawatan berada pada 694 jam hingga 1292 jam dengan nilai keandalan berada pada 31% hingga 50%. Setelah dilakukan simulasi Monte Carlo diperoleh selang waktu perawatan berada pada 260 jam hingga 1312 jam dengan nilai keandalan berada pada 30% hingga 42%. Dari keseluruhan nilai MTTF tersebut, nilai keandalan cenderung tidak berubah signifikan setelah dilakukan simulasi Monte Carlo. Penurunan nilai keandalan secara signifikan setelah dilakukan simulasi Monte Carlo terjadi pada peralatan *cyclone separator boiler* unit 2.

Sedangkan pada Tabel 14 hasil perhitungan *mean time to repair* (MTTR) aktual pada delapan peralatan *boiler*, diketahui bahwa selang waktu perbaikan berada pada 1,60 jam hingga 2,95 jam dengan nilai keandalan berada pada 23% hingga 41%. Setelah dilakukan simulasi Monte Carlo diperoleh waktu perbaikan berada pada 1,57 jam hingga 2,26 jam dengan nilai keandalan berada pada 22% hingga 41%. Dari keseluruhan nilai MTTR tersebut, nilai keandalan cenderung tidak berubah signifikan setelah dilakukan simulasi Monte Carlo. Kenaikan nilai keandalan terjadi pada *PA fan boiler* unit 1 serta *coal feeder boiler* unit 2.

Terjadinya penurunan nilai keandalan dikarenakan sifat mesin yang dipengaruhi oleh umur pemakaian, semakin lama umur pemakaian maka akan kerusakan akan semakin sering terjadi. Nilai *mean time to failure* (MTTF) dan *mean time to repair* (MTTR) hasil simulasi Monte Carlo akan dijadikan acuan perawatan secara terjadwal (*predictive maintenance*).

4. KESIMPULAN

Hasil simulasi Monte Carlo pada delapan komponen kritis bagian *boiler* diperoleh diperoleh selang waktu perawatan (TTF) berada pada 260 jam hingga 1312 jam dengan nilai keandalan berada pada 30% hingga 42%. Sedangkan perolehan waktu perbaikan (TTR) berada pada 1,57 jam hingga 2,26 jam dengan nilai keandalan berada pada 22% hingga 41%.

5. SARAN

Jika dilakukan penelitian selanjutnya, disarankan agar menambahkan variabel biaya sehingga diperoleh keandalan yang optimal. Selain itu dapat digunakan algoritma heuristik lainnya untuk mendapatkan keandalan yang optimal.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] E. L. Putri, A. Bahauddin dan P. F. Ferdinant, "Usulan Jadwal Perawatan Pada Mesin Electric Arc Furnace 5 dengan Simulasi Monte Carlo," *Jurnal Teknik Industri*, vol. 1, no. 4, pp. 352-257, Des. 2013.
- [2] S. J. Kamat and M. W. Riley, "Determination reliability using Monte Carlo simulation". *IEEE Transactions on Reliability* 24 (1): 73-75, 1975.
- [3] S. H. Eko dan B. Untung, "Analisa Keandalan Sistem Bahan Bakar Motor Induk Pada Kapal Motor Leuser," *Jurnal Kapal*, vol. 5, no. 4, pp. 123-135, Juni 2008.
- [4] E. C. Ebeling, *An Introduction To Reliability And Maintainability Engineering*, International Ed. Singapore: McGraw Hill, 1997.
- [5] D. Priyanta, *Rekayasa Keandalan dan Perawatan*, Surabaya, Indonesia: Institut Teknologi Sepuluh November, 2000.
- [6] S. Sinulingga, *Metodologi Penelitian*, Medan, Indonesia: USU Press, 2011.