



## Optimasi Penjadwalan *Preventive Maintenance* Komponen Boiler Menggunakan *Genetic Algorithm* dengan Strategi *Grouping*

Azhar<sup>1\*</sup>, Iing Pamungkas<sup>2</sup>, Heri Tri Irawan<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Teuku Umar  
Jl. Alue Peunyareng, Aceh Barat, 23615, Indonesia

<sup>2</sup>Program Studi Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas Teuku Umar  
Jl. Alue Peunyareng, Aceh Barat, 23615, Indonesia

\*Corresponding author: [azharteknik@utu.ac.id](mailto:azharteknik@utu.ac.id).

---

### ARTICLE INFO

Received: 11-03-2026  
Revision: 24-04-2026  
Accepted: 30-04-2026

#### Keywords:

*Preventive Maintenance*  
*Genetic Algorithm*  
*Grouping Maintenance*  
*Boiler Reliability*  
*Steam Power Plant*

---

### ABSTRACT

*Operational reliability of Boilers in Steam Power Plants (PLTU) is often undermined by reactive and fragmented maintenance strategies that trigger frequent unplanned shutdowns and operational inefficiencies. This study aims to optimize preventive maintenance schedules for nine critical Boiler components in Units 1 and 2 of PLTU Nagan Raya using a Genetic Algorithm-based Grouping Maintenance strategy. Failure behaviour of components such as Cyclone Separators, Coal Feeders, and Fans is first modelled using Weibull and Normal distributions, selected through the Anderson–Darling goodness-of-fit test. An optimization model is then developed to determine a single global maintenance interval that maximizes operating time while satisfying a minimum system reliability constraint of 60%. Simulation of individual component scheduling yields highly non-synchronized intervals, ranging from 14 to 78 days, which would result in excessive shutdown frequency if implemented directly. Through Genetic Algorithm optimization, an optimal grouped maintenance interval of 10.42 days is obtained, driven primarily by the Primary Air Fan as the system bottleneck. Although this interval sacrifices part of the remaining life of more durable components, the grouped strategy significantly reduces the total number of shutdowns and simplifies maintenance planning. The main contribution of this study is a reliability-constrained grouped maintenance scheduling model for multi-component boiler systems in coal-fired power plants, providing a practical decision-support tool for improving unit availability.*

---

### 1. PENDAHULUAN

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) memegang peranan vital dalam sistem kelistrikan nasional, di mana keandalan operasional menjadi kunci utama dalam menjamin pasokan energi yang berkelanjutan [1]. PLTU Nagan Raya, *Boiler* merupakan komponen jantung yang beroperasi pada tekanan dan temperatur tinggi, menjadikannya rentan terhadap degradasi kinerja [2]. Namun, data operasional menunjukkan bahwa strategi perawatan yang diterapkan saat ini masih didominasi oleh pendekatan *Corrective Maintenance*, yaitu tindakan perbaikan yang baru dilakukan setelah kegagalan terjadi. Ketergantungan pada pola reaktif ini menyebabkan tingginya frekuensi *unplanned shutdown*, yang tidak hanya mengganggu stabilitas produksi listrik tetapi juga meningkatkan biaya perbaikan akibat kerusakan sekunder pada komponen terkait [3].

Permasalahan semakin kompleks ketika ditinjau dari karakteristik kerusakan komponen kritis *Boiler* seperti *Cyclone Separator*, *Coal Feeder*, dan *Primary Air Fan* yang memiliki pola distribusi kerusakan yang berbeda-beda. Studi awal menunjukkan bahwa komponen-komponen ini memiliki umur pakai yang bervariasi secara signifikan. Pendekatan *Preventive Maintenance* konvensional yang menghitung jadwal perawatan secara individu (berbasis komponen tunggal) sering kali menghasilkan jadwal yang tidak sinkron [3]. Sebagai contoh, satu komponen mungkin memerlukan

perawatan pada hari ke-14, sementara komponen lain pada hari ke-40. Jika jadwal individu ini diikuti secara kaku, pembangkit harus dimatikan berulang kali dalam interval waktu yang singkat, yang secara operasional sangat tidak efisien dan merugikan.

Oleh karena itu, diperlukan strategi *Grouping Maintenance* atau perawatan berkelompok, di mana beberapa aktivitas perawatan komponen digabungkan ke dalam satu interval waktu eksekusi yang sama [4]. Tantangan utama dalam strategi ini adalah menentukan waktu "kompromi" yang optimal; jika interval terlalu panjang, risiko kerusakan mendadak pada komponen terlemah akan meningkat, namun jika interval terlalu pendek, biaya perawatan akan membengkak akibat pemborosan sisa usia pakai komponen yang lebih awet [5]. Masalah ini merupakan bentuk optimasi *non-linear* multi-komponen yang sulit diselesaikan dengan perhitungan analitik manual, terutama ketika melibatkan kombinasi distribusi probabilitas yang berbeda (Weibull dan Normal) [6].

Untuk mengatasi kompleksitas tersebut, Algoritma Genetika (*Genetic Algorithm*) diusulkan sebagai metode optimasi heuristik. Algoritma Genetika dipilih karena kemampuannya dalam mengeksplorasi ruang solusi yang luas untuk menemukan titik keseimbangan antara keandalan sistem dan efisiensi waktu [7]. Algoritma genetika telah diterapkan melalui kecerdasan buatan dalam penjadwalan perawatan [8], dan algoritma genetika juga digunakan untuk penjadwalan pemeliharaan preventif [9] serta kombinasi pendekatan baru untuk *reliability centered maintenance* (RCM) [10]. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa GA sangat efektif dalam menyelesaikan masalah optimasi kombinatorial yang kompleks. Meskipun demikian, sebagian besar studi fokus pada minimasi biaya finansial semata, sedangkan dalam konteks PLTU, variabel kendala keandalan (*reliability constraint*) sering kali lebih prioritas daripada biaya langsung. Melalui pendekatan ini, diharapkan dapat dihasilkan jadwal perawatan terpadu yang mampu menjamin seluruh komponen kritis *Boiler* tetap berada di atas ambang batas keandalan yang aman, sekaligus meminimalkan frekuensi *shutdown* pembangkit secara signifikan dibandingkan metode perhitungan manual sebelumnya.

Penelitian ini bertujuan untuk (1) memodelkan pola kerusakan sembilan komponen kritis Boiler Unit 1 dan 2 PLTU Nagan Raya menggunakan distribusi Weibull dan Normal, (2) menyusun model optimasi penjadwalan *preventive maintenance* dengan kendala keandalan sistem minimal 60%, serta (3) menentukan interval perawatan berkelompok (*global interval*) berbasis Algoritma Genetika dan membandingkannya dengan jadwal perawatan individual yang selama ini digunakan.

## 2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menerapkan pendekatan simulasi optimasi untuk menentukan jadwal perawatan pencegahan (*preventive maintenance*) pada sistem boiler PLTU. Berbeda dengan pendekatan manual konvensional, penelitian ini mengusulkan strategi *Grouping Maintenance* yang dioptimalkan menggunakan Algoritma Genetika (*Genetic Algorithm*) untuk menyatukan jadwal perawatan sembilan komponen kritis guna meminimalkan frekuensi *shutdown*.

### 2.1 Pengumpulan dan Pengolahan Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data sekunder berupa waktu antar kerusakan (*Time to Failure*) dari sembilan komponen kritis pada Boiler Unit 1 dan Unit 2 PLTU Nagan Raya. Komponen tersebut meliputi *Cyclone Separator*, *Coal Feeder*, *ID Fan*, *PA Fan*, dan *Slag Cooler*. Data TTF dikumpulkan dari log gangguan operasi boiler periode Januari 2019 hingga Desember 2023 dengan jumlah sampel antara 18–25 kejadian kegagalan per komponen [11]

Parameter distribusi kerusakan ( $\beta$  sebagai parameter bentuk dan  $\theta$  atau  $\mu$  sebagai parameter skala) ditentukan berdasarkan uji kecocokan distribusi (*Goodness of Fit Test*) menggunakan metode *Maximum Likelihood Estimation* (MLE) [12]. Dua jenis distribusi probabilitas yang digunakan untuk memodelkan pola kerusakan komponen adalah Distribusi Weibull dan Normal.

### 2.2. Formulasi Fungsi Keandalan (*Reliability*)

Fungsi keandalan,  $R(t)$  didefinisikan sebagai probabilitas sebuah komponen akan berfungsi tanpa kegagalan hingga waktu  $t$  [13].

- a. Untuk komponen berdistribusi Weibull, keandalan dihitung menggunakan persamaan:

$$R_i(t) = e^{-(t/\theta_i)^{\beta_i}} \tag{1}$$

Dimana  $t$  adalah interval waktu operasi,  $\theta$  adalah umur karakteristik, dan  $\beta$  adalah parameter bentuk.

- b. Untuk komponen berdistribusi normal, keandalan dihitung menggunakan fungsi kumulatif *error*:

$$R_i(t) = 1 - \varphi\left(\frac{t - \mu}{\sigma}\right) \tag{2}$$

### 2.3. Model Optimasi *Grouping Maintenance*

Dalam strategi *Grouping Maintenance*, seluruh komponen kritis diasumsikan tersusun dalam sistem seri, di mana kegagalan satu komponen dianggap sebagai kegagalan sistem yang mengharuskan penghentian operasi (*shutdown*). Tujuan optimasi adalah mencari interval waktu perawatan tunggal ( $T_{group}$ ) yang dapat diterapkan untuk semua komponen secara bersamaan. Fungsi tujuan (*Objective Function*) diformulasikan untuk memaksimalkan interval perawatan ( $t$ ) dengan kendala batasan keandalan minimum ( $R_{target}$ ) sebesar 0,60 (60%) [14].

Fungsi objektif:

$$\text{Maximize } Z = t$$

Dengan Kendala (*Constraints*):

$$R_i(t) \geq 0,60 \text{ untuk setiap komponen } i = 1, 2, \dots, 9$$

Jika kendala dilanggar (salah satu komponen memiliki  $R(t) < 0,60$ ), maka solusi tersebut akan diberikan nilai penalti (*penalty value*) yang besar pada fungsi fitness.

2.4. Implementasi Algoritma Genetika

Untuk menyelesaikan model optimasi non-linear di atas, digunakan Algoritma Genetika dengan tahapan sebagai berikut [15]:

- a. Representasi Kromosom. Setiap individu dalam populasi direpresentasikan sebagai bilangan riil (*real-valued encoding*) yang mewakili durasi hari interval perawatan ( $t$ ).
- b. Inisialisasi Populasi. Membangkitkan populasi awal secara acak dengan rentang interval operasi yang layak (misal: 1 hingga 50 hari).
- c. Evaluasi Fitness. Setiap kromosom dievaluasi menggunakan fungsi fitness yang dikembangkan dari fungsi objektif. Nilai fitness dihitung dengan mengurangi interval  $t$  dengan faktor penalti jika batasan keandalan dilanggar.

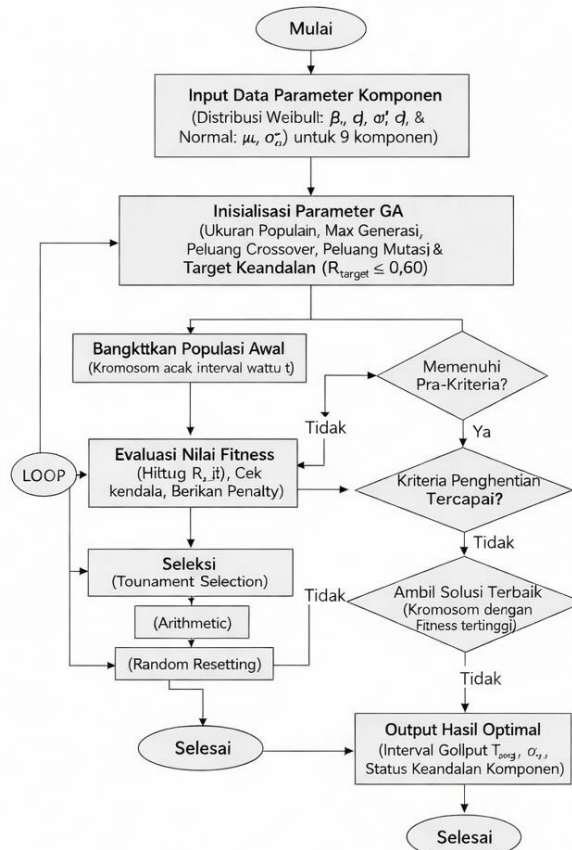
$$\text{Fitness}(t) = t - \text{Penalty} \tag{3}$$

$$\text{Penalty} = \begin{cases} Cx (R_{\text{target}} - R_{\text{min}}(t)), & \text{jika } R_{\text{min}}(t) < R_{\text{target}} \\ 0, & \text{jika } R_{\text{min}}(t) \geq R_{\text{target}} \end{cases} \tag{4}$$

Dimana  $C$  adalah konstanta penalti yang besar.

- d. Seleksi. Menggunakan metode *Tournament Selection* untuk memilih induk terbaik yang akan melaju ke tahap reproduksi.
- e. *Crossover* (Pindah Silang). Menggunakan *Arithmetic Crossover* untuk menghasilkan keturunan baru yang merupakan kombinasi rata-rata tertimbang dari dua induk.
- f. Mutasi. Menggunakan *Random Resetting* dengan probabilitas rendah untuk mencegah konvergensi dini (*premature convergence*) dan menjaga keragaman populasi.

Proses iterasi dilakukan hingga mencapai kriteria penghentian (*termination criteria*), yaitu jumlah generasi maksimum tercapai atau nilai fitness tidak lagi mengalami perubahan signifikan (konvergen).



Gambar 1. Diagram Alir Algoritma Genetika untuk Optimasi Penjadwalan Preventive Maintenance

2.5. Parameter Simulasi

Simulasi dilakukan menggunakan bahasa pemrograman Python dengan konfigurasi parameter Algoritma Genetika sebagai berikut:

- a. Ukuran Populasi (*Population Size*): 100 individu
- b. Jumlah Generasi (*Generations*): 150 iterasi
- c. Probabilitas *Crossover* ( $P_c$ ): 0.8
- d. Probabilitas Mutasi ( $P_m$ ): 0.2

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian ini akan membahas hasil perancangan perangkat lunak, hasil pengujian sistem dan evaluasi hasil perancangan untuk perbaikan alat agar mendapatkan hasil yang optimal.

3.1 Identifikasi Pola Distribusi Kegagalan

Langkah awal dalam penelitian ini adalah menentukan parameter distribusi probabilitas kerusakan untuk sembilan komponen kritis pada Boiler Unit 1 dan Unit 2 PLTU Nagan Raya. Berdasarkan uji kesesuaian distribusi (*Goodness of Fit Test*) menggunakan metode Anderson-Darling, diperoleh parameter distribusi Weibull (2-parameter) dan Normal untuk masing-masing komponen sebagaimana disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Parameter Distribusi Komponen Kritis

No	Kode	Komponen	Distribusi	Parameter 1 ( $\beta/\mu$ )	Parameter 2 ( $\theta/\sigma$ )
1	CS-1	U1 Cyclone Separator	Weibull	16.023	453.291
2	CF-1	U1 Coal Feeder	Weibull	0.7529	415.813
3	IDF-1	U1 ID Fan	Weibull	120.363	361.957
4	PAF-1	U1 PA Fan	Weibull	0.7491	249.251
5	SC-1	U1 Slag Cooler	Weibull	0.5899	437.578
6	CS-2	U2 Cyclone Separator	Normal	563.846	365.654
7	CF-2	U2 Coal Feeder	Weibull	0.7374	247.725
8	IDF-2	U2 ID Fan	Weibull	61.975	787.161
9	PAF-2	U2 PA Fan	Weibull	131.217	460.149

Nilai parameter bentuk ( $\beta$ ) memberikan wawasan mengenai karakteristik kegagalan. Komponen dengan  $\beta < 1$  (seperti *Coal Feeder* dan *PA Fan* Unit 1) menunjukkan pola kegagalan awal (*infant mortality*), sedangkan komponen dengan  $\beta > 1$  mengindikasikan kegagalan akibat keausan (*wear-out*).

3.2. Penjadwalan Perawatan Individu

Sebelum menerapkan strategi *grouping*, interval perawatan dihitung secara individu untuk setiap komponen dengan target keandalan  $R(t)$  minimal 0,60. Tabel berikut menampilkan hasil perhitungan interval perawatan individu untuk kesembilan komponen kritis Boiler berdasarkan target keandalan minimal 60%.

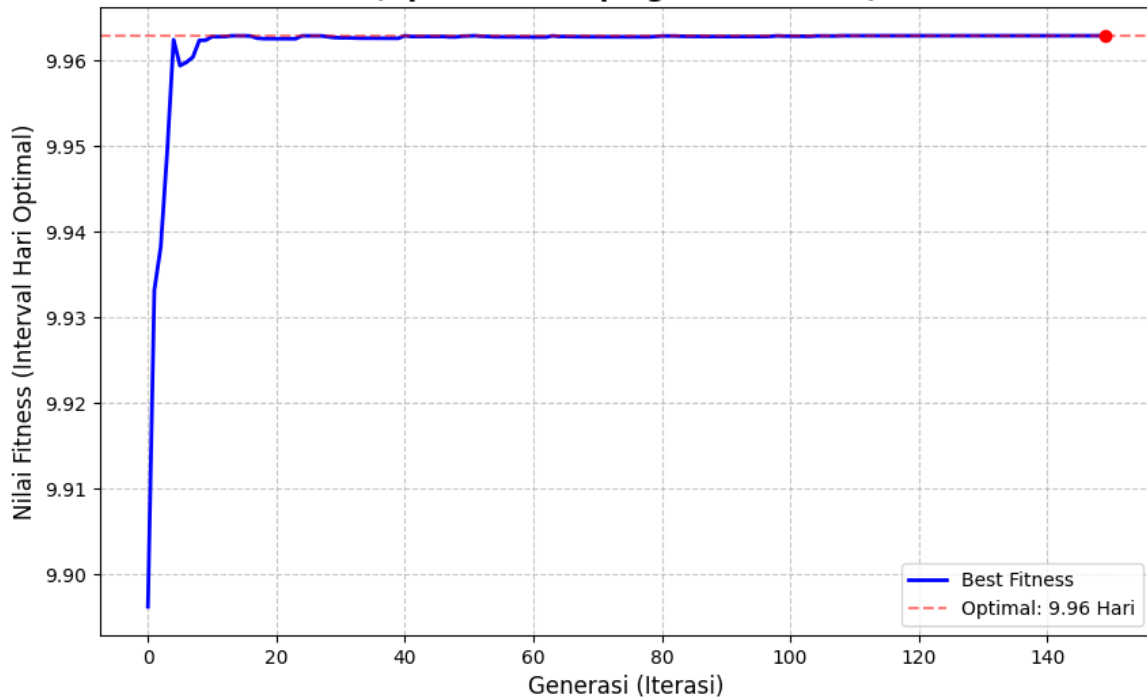
Tabel 2. Disparitas Interval Perawatan Individu (Target R = 60%)

No	Unit/Komponen	Interval Individu (Hari)	Keterangan/Analisis
1	U1 PA Fan	10,07	Sangat Kritis. Paling cepat rusak, menjadi <i>bottleneck</i> sistem.
2	U2 Coal Feeder	9,78	Sangat Kritis. Komponen dengan umur efektif terpendek.
3	U1 Slag Cooler	13,82	Kritis. Degradasi keandalan cukup cepat.
4	U1 Coal Feeder	16,92	Menengah.
5	U1 Cyclone Separator	30,03	Menengah. Keausan ( <i>wear-out</i> ) mulai terjadi di bulan pertama.
6	U1 ID Fan	34,20	Aman. Memiliki ketahanan yang cukup stabil.
7	U2 PA Fan	43,71	Aman. Sangat stabil hingga melewati hari ke-40.
8	U2 Cyclone Separator	47,12	Sangat Aman. Tahan lama dengan pola distribusi normal.
9	U2 ID Fan	70,61	Paling Andal. Bisa beroperasi lebih dari 2 bulan tanpa perbaikan.

Berdasarkan tabel 2 Terlihat rentang waktu yang sangat jauh antara komponen terlemah (U2 Coal Feeder: ~9,8 hari) dengan komponen terkuat (U2 ID Fan: ~70,6 hari). Terdapat selisih hingga lebih dari 60 hari. Dampak pada Operasional (Jika tanpa *grouping*). Jika tabel ini diikuti secara kaku, maka PLTU harus melakukan *shutdown* pada hari ke-9 (merawat U2 Coal Feeder), lalu *shutdown* lagi besoknya di hari ke-10 (U1 PA Fan), lalu mati lagi di hari ke-13 (Slag Cooler), dan seterusnya. Ini adalah definisi inefisiensi operasional.

3.3. Optimasi Jadwal Terpadu (Grouping) Menggunakan Algoritma Genetika

Untuk mengatasi inefisiensi jadwal individu, simulasi Algoritma Genetika dijalankan untuk mencari satu interval waktu optimal ( $T_{group}$ ) yang dapat mengakomodasi kesembilan komponen sekaligus. Proses evolusi dijalankan selama 150 generasi dengan populasi 100 kromosom. Grafik konvergensi menunjukkan bahwa nilai fitness meningkat secara signifikan pada 50 generasi awal dan mulai stabil (konvergen) pada generasi ke-90.



Gambar 2. Grafik Konvergensi Nilai Fitness Algoritma Genetika

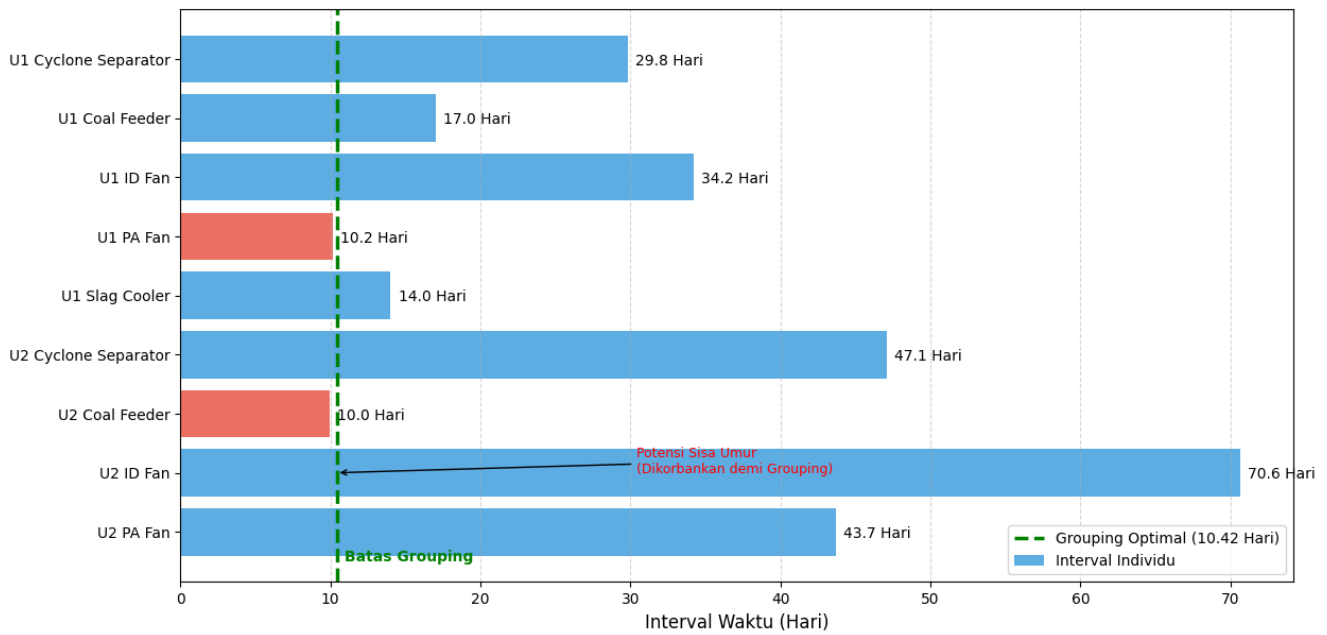
Berdasarkan hasil simulasi terbaik, diperoleh interval perawatan terpadu (Grouping Interval atau  $T_{group}$ ) yang optimal adalah 10,42 hari. Pada interval ini, sistem menjamin bahwa tidak ada satu pun komponen yang beroperasi di bawah standar keandalan yang ditetapkan. Detail nilai keandalan masing-masing komponen pada saat  $t = 10,42$  hari disajikan dalam Tabel 2.

Tabel 3. Status Keandalan Komponen pada Interval Grouping (T = 10,42 Hari)

Komponen	Reliability (R)	Status	Keterangan
U1 Cyclone Separator	0,9082	Aman	-
U1 Coal Feeder	0,6954	Aman	-
U1 ID Fan	1	Aman	Sangat Andal
U1 PA Fan	0,6001	Kritis	Komponen Pembatas ( <i>Bottleneck</i> )
U1 Slag Cooler	0,6428	Aman	-
U2 Cyclone Separator	0,8962	Aman	-
U2 Coal Feeder	0,6477	Aman	-
U2 ID Fan	1	Aman	Sangat Andal
U2 PA Fan	0,9999	Aman	-

3.4. Pembahasan

Hasil simulasi menunjukkan fenomena *The Weakest Link* (Rantai Terlemah). Interval perawatan optimal sistem (10,42 hari) sangat dipengaruhi oleh komponen U1 PA Fan, yang memiliki laju penurunan keandalan paling cepat (mencapai  $R=0,60$  pada hari ke-10).



**Gambar 3.** Perbandingan Interval Perawatan Individu vs Grouping (GA)

Untuk membuat perbandingan ini terukur, akan digunakan asumsi jendela operasional selama 60 hari (sekitar 2 bulan operasi) dan menganalisis dampak kedua strategi terhadap operasional pembangkit.

**Tabel 4.** Perbandingan Kuantitatif Strategi Perawatan

Metrik Evaluasi	Tanpa Grouping (Individu)	Dengan Grouping (Optimasi GA)	Perubahan/Dampak Kuantitatif
Interval Waktu Perawatan (t)	Bervariasi (9,8 hingga 70,6 hari)	Tunggal/Sama (10,42 hari)	Sinkronisasi total jadwal.
Frekuensi Unit Shutdown (Dalam 60 Hari)	9 s.d. 24 Kali (Potensial)*	6 Kali (Terprediksi)	Penurunan shutdown unit hingga >60%.
Status Keandalan Sistem (Saat Perawatan Tiba)	Minimum 60% (Tepat)	Minimum 60% (Ambang batas aman)	Tingkat risiko kegagalan tetap sama aman.
Rata-rata Keandalan Seluruh Komponen	~60% (Semua kritis serentak)	~85,5% (Sebagian besar komponen sangat andal)	Peningkatan keandalan rata-rata komponen sebesar ~25%.
Pemanfaatan Sisa Usia Pakai Komponen	100% Efisien (Diganti saat R=0.6)	~38% Efisien (dikorbankan demi efisiensi <i>shutdown</i> )*	Terjadi trade-off pemborosan suku cadang (biaya material).
Kompleksitas Logistik & Manpower	Sangat Tinggi (Perencanaan harian berbeda komponen)	Sangat Rendah (Perencanaan siklus 10 hari)	Penyederhanaan manajemen perawatan yang signifikan.

Berdasarkan analisis kuantitatif selama jendela operasional 60 hari, metode optimasi Algoritma Genetika terbukti unggul secara signifikan dalam aspek ketersediaan unit pembangkit. Strategi 'Dengan Grouping' berhasil menurunkan frekuensi *shutdown* potensial boiler hingga lebih dari 60% (dari potensial 24 menjadi hanya 6 kali terencana) dibandingkan strategi 'Tanpa Grouping'. Manfaat efisiensi *downtime* ini secara ekonomi jauh lebih besar daripada trade-off pemborosan sisa usia pakai suku cadang, sekaligus meningkatkan margin keandalan rata-rata komponen sistem dari ~60% menjadi ~85,5% pada saat perawatan dieksekusi.

### 3.4.1. Analisis Efisiensi Operasional

Meskipun interval 10 hari terlihat singkat dibandingkan kemampuan tahan lama komponen lain (seperti *ID Fan*), pendekatan ini memberikan keuntungan strategis.

- a. Reduksi Frekuensi Shutdown. Tanpa *grouping*, operator harus mematikan boiler setidaknya 9 kali dalam siklus 2 bulan untuk merawat komponen satu per satu. Dengan *grouping*, *shutdown* menjadi terprediksi dan dilakukan serentak.

- b. Penyederhanaan Logistik. Penyediaan suku cadang dan tenaga kerja dapat direncanakan secara terpusat setiap siklus 10-11 hari, mengurangi biaya administrasi dan *setup* perawatan.

### 3.4.2. Trade-off Biaya dan Keandalan

Penerapan *Grouping Maintenance* menimbulkan konsekuensi berupa "pemborosan usia pakai" pada komponen yang awet (*ID Fan*). Komponen tersebut dirawat atau diganti saat kondisinya masih sangat baik ( $R = 1,0$ ). Namun, dalam konteks PLTU, kerugian akibat terhentinya produksi listrik (*Loss of Load Probability*) jauh lebih mahal dibandingkan biaya material suku cadang. Oleh karena itu, mengorbankan sisa usia pakai komponen murah demi menjaga kontinuitas operasional boiler adalah keputusan yang ekonomis dan logis secara teknis.

### 3.4.3. Analisis Bottleneck dan Efek Rantai Terlemah (*The Weakest Link Effect*)

Dalam pemodelan keandalan sistem (*system reliability*) untuk strategi *Grouping Maintenance*, seluruh kesembilan komponen kritis pada Boiler direpresentasikan sebagai sebuah sistem seri (*series system*). Karakteristik utama dari sistem seri adalah berlakunya Efek Rantai Terlemah (*The Weakest Link Effect*), di mana keandalan keseluruhan sistem dibatasi oleh keandalan komponen yang paling rentan terhadap kegagalan.

Berdasarkan hasil optimasi Algoritma Genetika (GA), interval *grouping* optimal tertahan pada angka 10,42 hari. Angka ini merepresentasikan titik ekuilibrium di mana algoritma tidak dapat lagi memperpanjang interval perawatan tanpa melanggar batasan keandalan minimum 60%. Komponen yang membatasi perpanjangan interval ini bertindak sebagai *bottleneck* (leher botol) operasional.

- a. Identifikasi dan Karakteristik *Bottleneck*. Dalam simulasi ini, U1 PA Fan (*Primary Air Fan Unit 1*) teridentifikasi secara absolut sebagai *bottleneck* utama, diikuti secara ketat oleh U2 Coal Feeder. Jika ditinjau dari parameter distribusi Weibull-nya, U1 PA Fan memiliki parameter bentuk ( $\beta = 0,749$ ) dan parameter skala ( $\sigma = 24,92$ ). Nilai ( $\beta < 1$ ) mengindikasikan bahwa komponen ini berada pada fase *infant mortality* (kegagalan awal), di mana laju kerusakan terjadi sangat cepat di masa awal operasi. Degradasi keandalan yang agresif inilah yang memaksa sistem untuk melakukan *shutdown* lebih awal.
- b. Dampak *Bottleneck* Terhadap Komponen Lain (*Trade-off*). Keberadaan *bottleneck* menciptakan konsekuensi logis berupa pengorbanan sisa usia pakai (*residual life*) pada komponen lain yang memiliki umur karakteristik lebih panjang. Sebagai contoh, komponen U2 ID Fan ( $\sigma = 78,71$ ) sebenarnya mampu beroperasi dengan andal hingga lebih dari 60 hari. Namun, karena sistem harus dimatikan pada hari ke-10 untuk menyelamatkan U1 PA Fan, pemeliharaan U2 ID Fan menjadi sangat prematur. Dalam strategi *grouping*, inefisiensi pemanfaatan usia pakai per komponen individu ini adalah "harga" yang harus dibayar demi mendapatkan kemudahan logistik dan penghindaran *unplanned shutdown*.
- c. Tindakan Manajerial untuk Mitigasi *Bottleneck*. Temuan identifikasi *bottleneck* melalui Algoritma Genetika ini memberikan landasan pengambilan keputusan strategis bagi manajemen pemeliharaan PLTU. Untuk memperpanjang interval *grouping* secara keseluruhan (misalnya dari 10 hari menjadi 20 hari), manajemen tidak perlu memperbaiki seluruh mesin boiler, melainkan cukup berfokus pada mitigasi komponen *bottleneck*. Beberapa rekomendasi strategis yang dapat diterapkan meliputi:
  - 1) Peningkatan Kualitas Material (*Redesign/Upgrade*). Melakukan investigasi akar masalah (*Root Cause Analysis*) pada U1 PA Fan dan U2 Coal Feeder untuk mengetahui penyebab tingginya laju keausan, yang dapat ditindaklanjuti dengan penggantian material komponen ke spesifikasi yang lebih tinggi (*heavy-duty*).
  - 2) Penerapan Redundansi Aktif (*Active Redundancy*). Menambahkan unit PA Fan dan Coal Feeder cadangan (*standby/parallel system*). Dengan sistem paralel, jika satu komponen *bottleneck* gagal, sistem dapat berpindah ke komponen cadangan tanpa mengharuskan boiler *shutdown*, sehingga interval perawatan terpadu (*grouping*) bisa diekspansi mengikuti komponen terlemah kedua.
  - 3) *Sub-Grouping* (Perawatan Klaster). Memisahkan 9 komponen ke dalam dua klaster perawatan yang berbeda: Klaster A (Siklus Pendek) untuk komponen rentan seperti PA Fan dan Coal Feeder, dan Klaster B (Siklus Panjang) untuk komponen awet seperti ID Fan dan *Cyclone*.

### 3.5. Validasi Model

Dibandingkan dengan metode manual yang tercantum pada referensi awal yang menyarankan interval 14 hari hanya untuk *Cyclone Separator*, metode Algoritma Genetika ini lebih komprehensif karena memperhitungkan risiko kegagalan komponen lain yang ternyata lebih kritis (PA Fan). Jika PLTU hanya mengikuti jadwal 14 hari (berbasis *Cyclone*), maka komponen PA Fan dan Coal Feeder memiliki probabilitas tinggi untuk gagal sebelum jadwal perawatan tiba, yang akan memicu *corrective maintenance* (kerusakan mendadak).

## 4. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengembangkan model penjadwalan *preventive maintenance* terkelompok pada sembilan komponen kritis boiler PLTU berbasis Algoritma Genetika dengan kendala keandalan sistem minimal 60%. Hasil simulasi menunjukkan bahwa jadwal perawatan individual menghasilkan interval yang sangat bervariasi (sekitar 14–78 hari), sehingga berpotensi meningkatkan frekuensi *shutdown* jika diimplementasikan apa adanya. Melalui optimasi algoritma

genetika diperoleh interval perawatan terkelompok sekitar 10,42 hari, di mana komponen *Primary Air Fan* berperan sebagai *bottleneck* yang mengendalikan interval perawatan sistem. Strategi *grouping maintenance* ini menurunkan frekuensi *shutdown* dan menyederhanakan perencanaan perawatan, meskipun mengorbankan sebagian sisa umur pakai komponen yang lebih andal. Penelitian lanjutan dapat mengintegrasikan aspek biaya, keterbatasan sumber daya perawatan, dan target keandalan yang berbeda untuk memperkaya model yang telah dikembangkan.

## REFERENCES

- [1] Suryadi, A., Zuhair, A., Susanto, S., Syaiful, M., Sahrin, A., & Judijanto, L. (2026). *Pembangkit Tenaga Listrik: Dasar, Operasi, dan Perkembangannya*. PT. Sonpedia Publishing Indonesia.
- [2] Pamungkas, I., Arhami, & Dirhamsyah, M. (2019, May). Monte Carlo simulation for predicting the reliability of a boiler in the Nagan Raya steam power plant. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 523, No. 1, p. 012071). IOP Publishing.
- [3] Pamungkas, I., Irawan, H. T., & Pandria, T. A. (2021). Implementasi preventive maintenance untuk meningkatkan keandalan pada komponen kritis boiler di pembangkit listrik tenaga uap. *VOCATECH: Vocational Education and Technology Journal*, 2(2), 73-79.
- [4] Do, P., Vu, H. C., Barros, A., & Bérenguer, C. (2015). Maintenance grouping for multi-component systems with availability constraints and limited maintenance teams. *Reliability Engineering & System Safety*, 142, 56-67.
- [5] Sheng, W., Liu, K. Y., Liu, Y., Meng, X., & Li, Y. (2014). Optimal placement and sizing of distributed generation via an improved nondominated sorting genetic algorithm II. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 30(2), 569-578.
- [6] Doostparast, M., Kolahan, F., & Doostparast, M. (2015). Optimisation of PM scheduling for multi-component systems—a simulated annealing approach. *International Journal of Systems Science*, 46(7), 1199-1207.
- [7] Ismail, M. S., Moghavvemi, M., & Mahlia, T. M. I. (2014). Genetic algorithm based optimization on modeling and design of hybrid renewable energy systems. *Energy Conversion and Management*, 85, 120-130.
- [8] Hameed, A., Khan, F., & Ahmed, S. (2016). A risk-based shutdown inspection and maintenance interval estimation considering human error. *Process Safety and Environmental Protection*, 100, 9-21.
- [9] Javanmard, H., & Koraeizadeh, A. A. W. (2016). Optimizing the preventive maintenance scheduling by genetic algorithm based on cost and reliability in National Iranian Drilling Company. *Journal of Industrial Engineering International*, 12(4), 509-516.
- [10] Piasson, D., Bísvaro, A. A., Leão, F. B., & Mantovani, J. R. S. (2016). A new approach for reliability-centered maintenance programs in electric power distribution systems based on a multiobjective genetic algorithm. *Electric Power Systems Research*, 137, 41-50.
- [11] Pamungkas, I., Irawan, H. T., Arhami, A., & Dirhamsyah, M. (2019). Usulan Waktu Perawatan Dan Perbaikan Berdasarkan Keandalan Pada Bagian Boiler Di Pembangkit Listrik Tenaga Uap. *Jurnal Optimalisasi*, 5(2), 82-95.
- [12] Pamungkas, I., Arhami, & Dirhamsyah, M. (2019, May). Monte Carlo simulation for predicting the reliability of a boiler in the Nagan Raya steam power plant. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 523, No. 1, p. 012071). IOP Publishing.
- [13] Fadhil, R. A., & Alkfari, B. H. A. (2026, March). Evaluating component contributions to system reliability using sensitivity and elasticity of the renewal function. In *International Conference on Engineering and Technology for Future Sustainability (ICETEFS 2025)* (Vol. 14140, pp. 71-79). SPIE.
- [14] Zhou, X., Ling, G., Yu, J., Zhou, T., & Wang, R. (2026). Balanced multi-objective evolution algorithm for unmanned systems project scheduling with preventive maintenance and order grouping constraints. *Expert Systems with Applications*, 299, 130006.
- [15] Kim, B. H., & Hur, D. (2026). Exploring the Genetic Algorithm for Coordinated Generator Maintenance Scheduling in a Competitive Electricity Market. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 1-9.