Armatur volume 8 nomor 1 (2027)
ISSN (cetak): 2722-080X, ISSN (online): 2722-0796

Contents list available at Sinta

ARMATUR

: Artikel Teknik Mesin & Manufaktur

Journal homepage: https://scholar.ummetro.ac.id/index.php/armatur

Evaluasi Efisiensi dan Keandalan Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) Sebelum dan Sesudah *Turn Around* pada *Critical Equipment* dengan Kajian Ekonomi

Vira Nur Sanina[1*], Retno Aita Diantari[2]
[1,2]Program Studi Teknik Elektro, Institut Teknologi PLN, Menara PLN, Jl. Lingkar Luar Barat, Duri Kosambi, Cengkareng, Jakarta Barat 17750.

ARTICLE INFO

Keywords:
Geothermal Power Plant
Turn Around
Equipment Performance
Reliability
Economic Performance

ABSTRACT

Geothermal Power Plants provide reliable baseload electricity and play an important role in Indonesia's renewable energy transition. However, long-term operation may degrade the performance of critical equipment, reducing plant efficiency and reliability. This study evaluates the impact of Turn Around (TA) maintenance on the technical, reliability, and operational financial performance of Kamojang Unit 4 Geothermal Power Plant (60 MW). A quantitative comparative approach was applied using actual daily operational data collected during equivalent 12month periods before and after TA during September 2023 – August 2024 and December2024 – November 2025. The evaluated parameters included output power, turbine efficiency, condenser and cooling tower performance, MTBF, MTTR, EAF, EFOR, energy production, Capacity Factor, Cost of Downtime, and revenue. Results show improvements in technical and reliability performance after TA, including increases in output power, turbine efficiency, cooling tower effectiveness, MTBF, and EAF, as well as reductions in MTTR and EFOR. Consequently, net energy production increased by 8.52%, annual gross incremental revenue reached IDR 61.69 billion, and Cost of Downtime decreased by 90.94%. These results indicate that TA contributes significantly to improving plant performance, reliability, and operational financial outcomes.

**Corresponding author*: *vira2410023@itpln.ac.id*
DOI: https://doi.org/10.24127/armatur.v8i1.12862
Received 19 August 2026; Received in revised form 29 September 2026; Accepted 05 October 2026
Available online March 2027

Pendahuluan

Perkembangan sektor energi di Indonesia semakin mengarah pada pemanfaatan Energi Baru Terbarukan (EBT) untuk mengurangi ketergantungan terhadap energi fosil dan mendukung pencapaian target bauran energi nasional. Pemerintah menargetkan porsi EBT mencapai 23% pada tahun 2025 dan 31% pada tahun 2050, sementara RUPTL 2025–2034 juga menempatkan energi terbarukan sebagai prioritas pengembangan pembangkit listrik nasional [1][2]. Namun, pemanfaatan energi panas bumi masih relatif rendah dibandingkan potensinya, sehingga diperlukan upaya peningkatan kinerja pembangkit yang telah beroperasi selain pembangunan unit baru [3].

Upaya peningkatan performa pembangkit tidak hanya dilakukan melalui peningkatan kapasitas pembangkit, tetapi juga melalui optimasi operasi lapangan dan peningkatan keandalan peralatan pembangkit. Studi pada Lapangan Panas Bumi Patuha menunjukkan bahwa pengelolaan lapangan dan optimasi operasi mampu meningkatkan kapasitas pembangkitan serta keandalan sistem secara keseluruhan [4].

Energi panas bumi memiliki keunggulan sebagai sumber energi *baseload* yang mampu menghasilkan listrik secara kontinu dan tidak bergantung pada kondisi cuaca [5]. Salah satu pembangkit yang berperan penting dalam penyediaan energi listrik berbasis panas bumi adalah PLTP Kamojang Unit 4 berkapasitas 60 MW. Setelah beroperasi selama hampir dua dekade, beberapa *critical equipment* seperti turbin, *condenser*, dan *cooling tower* mengalami degradasi performa akibat *scaling*, *fouling*, korosi, dan penuaan material yang berpotensi menurunkan efisiensi serta keandalan pembangkit [6].

Untuk mempertahankan kinerja pembangkit, diterapkan strategi *Operation and Maintenance* (O&M) melalui kegiatan pemeliharaan besar (*Turn Around*). Kegiatan ini meliputi inspeksi, perbaikan, penggantian komponen dan pengujian performa peralatan guna mengembalikan kondisi operasi mendekati desain awal [7], [8]. Keberhasilan pelaksanaan *Turn Around* diharapkan mampu meningkatkan efisiensi peralatan, mengurangi gangguan operasi, dan meningkatkan ketersediaan pembangkit.

Selain memberikan dampak teknis, pelaksanaan *Turn Around* juga memiliki implikasi ekonomi yang signifikan karena membutuhkan biaya investasi pemeliharaan yang relatif besar. Oleh karena itu, keberhasilan program ini perlu dievaluasi tidak hanya dari aspek teknis dan keandalan, tetapi juga dari aspek ekonomi seperti produksi energi, *downtime* dan pendapatan pembangkit [9][10].

Beberapa penelitian sebelumnya telah membahas optimasi interval pemeliharaan, *Reliability Centered Maintenance* (RCM), dan evaluasi manajemen pemeliharaan pada pembangkit panas bumi. Studi oleh Nataprawira dan Zulkarnain [8] berfokus pada penentuan interval pemeliharaan optimum berdasarkan nilai keandalan dan biaya, sedangkan Nugraha et al. [9] mengevaluasi penerapan RCM untuk meningkatkan keandalan peralatan pembangkit panas bumi. Penelitian Belayneh [10] meninjau efektivitas manajemen pemeliharaan melalui pendekatan *benchmarking*. Sementara itu, penelitian pada PLTP Kamojang Unit 4 oleh Suparmin et al. [11] menunjukkan bahwa kegiatan *overhaul* mampu meningkatkan efisiensi siklus termal pembangkit. Namun, penelitian-penelitian tersebut masih mengevaluasi aspek termal, keandalan, atau pemeliharaan secara terpisah sehingga belum memberikan evaluasi terintegrasi mengenai dampak *Turn Around* terhadap kinerja pembangkit. Selain itu, pendekatan *techno-economic evaluation* yang mengintegrasikan aspek teknis dan ekonomi telah banyak direkomendasikan dalam literatur [12], namun penerapannya pada evaluasi *Turn Around* PLTP masih terbatas.

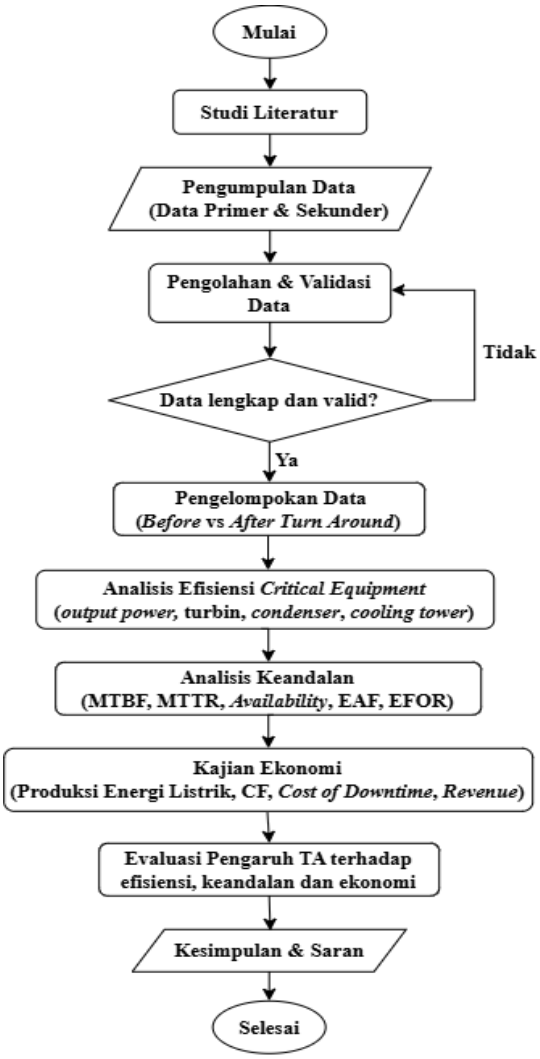
Berdasarkan kondisi tersebut, masih terdapat *research gap* terkait evaluasi komprehensif dampak *Turn Around* pada pembangkit panas bumi. Kebaruan (*novelty*) artikel ini terletak pada integrasi evaluasi kinerja *critical equipment* (turbin, *condenser* dan *cooling tower*), indikator keandalan (MTBF, MTTR, EAF, dan EFOR), serta indikator ekonomi (produksi energi, *capacity factor*, *cost of downtime* dan *revenue*) menggunakan periode pengamatan yang sama sebelum dan sesudah *Turn Around*. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan mengevaluasi pengaruh *Turn Around* terhadap kinerja teknis, keandalan operasi, dan kinerja ekonomi PLTP Kamojang Unit 4 secara terintegrasi.

Metode Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di PLTP Area Kamojang Unit 4. Penelitian bertujuan mengevaluasi pengaruh pelaksanaan *Turn Around* (TA) terhadap kinerja teknis, keandalan, dan kinerja ekonomi pembangkit. Data penelitian diperoleh dari data operasi aktual pembangkit, laporan operasi unit, laporan pemeliharaan, dan data historis gangguan operasi yang terdokumentasi. Parameter yang dianalisis meliputi *output power*, efisiensi turbin, performa *condenser*, efektivitas *cooling tower*, *Mean Time Between Failure* (MTBF), *Mean Time To Repair* (MTTR), *Equivalent Availability Factor* (EAF), *Equivalent Forced Outage Rate* (EFOR), *Capacity Factor* (CF), produksi energi listrik, *cost of downtime*, dan *revenue* pembangkit.

Pendekatan Penelitian. Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif komparatif dengan membandingkan parameter operasi pembangkit sebelum dan sesudah pelaksanaan *Turn Around*. Analisis dilakukan untuk mengevaluasi perubahan kinerja pada *critical equipment* yang terdiri dari turbin, *condenser*, dan *cooling tower*, serta dampaknya terhadap keandalan dan kinerja ekonomi pembangkit.

Adapun flowchart penelitian seperti gambar berikut.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian.

Tabel 1. Periode Pengamatan Penelitian

Keterangan	Sebelum TA	Sesudah TA
Periode Pengamatan	September 2023 – Agustus 2024	Desember 2024 – November 2025
Lama Pengamatan	12 bulan	12 bulan
Jumlah Hari Operasi	365 hari	365 hari

Instrumen Penelitian. Data operasi pembangkit diperoleh melalui sistem *Distributed Control System* (DCS) dan *Supervisory Control and Data Acquisition*

(SCADA) yang digunakan untuk memantau kondisi operasi pembangkit secara *real-time*. Data keandalan peralatan diperoleh dari *reliability report*, laporan gangguan, Data Kondisi Pembangkit (DKP), pemeliharaan unit serta dokumen Perjanjian Jual Beli Tenaga Listrik (PJBL). Instrumen dan sumber data tersebut digunakan untuk memperoleh data *output power*, tekanan dan temperatur operasi, produksi energi, MTBF, MTTR, EAF, EFOR, *capacity factor*, *cost of downtime* dan *revenue* pembangkit.

Analisis Data. Analisis data dilakukan menggunakan Microsoft Excel untuk mengolah, menghitung, dan membandingkan parameter operasi pembangkit sebelum dan sesudah pelaksanaan *Turn Around*.

Analisis Daya Keluaran Pembangkit

Daya keluaran (*output power*) merupakan indikator utama performa pembangkit yang menunjukkan kemampuan sistem mengubah energi panas bumi menjadi energi listrik. Persentase peningkatan daya setelah *Turn Around* dihitung menggunakan persamaan (1).

$$\%\Delta P = \frac{P_{after} - P_{before}}{P_{before}} \times 100\% \quad (1)$$

dimana:
P_{before} = daya keluaran rata-rata sebelum *Turn Around* (MW)
P_{after} = daya keluaran rata-rata sesudah *Turn Around* (MW)

Analisis Efisiensi Turbin

Efisiensi turbin merupakan parameter yang menunjukkan kemampuan turbin dalam mengonversi energi termal uap menjadi energi mekanik. Evaluasi efisiensi dilakukan menggunakan pendekatan perbandingan antara daya aktual turbin terhadap daya teoritis yang diperoleh dari proses ekspansi isentropik uap. Metode ini banyak digunakan dalam evaluasi performa turbin pada pembangkit panas bumi karena mampu menggambarkan tingkat pemanfaatan energi uap yang tersedia selama proses konversi energi [13][14].

$$\eta_t = \frac{P_{aktual}}{P_{teoritis}} \times 100\% \quad (2)$$

dimana:
η_t = efisiensi turbin (%)
P_{aktual} = daya aktual turbin (MW)
$P_{teoritis}$ = daya teoritis turbin (MW)
Daya teoritis turbin dihitung menggunakan perubahan entalpi isentropik dan laju aliran massa uap sebagaimana ditunjukkan pada persamaan (3).

$$P_{teoritis} = \dot{m}(h_1 - h_{2s}) \quad (3)$$

dimana:
$\dot{m}$ = laju aliran massa uap (kg/s)
h_1 = entalpi uap inlet turbin (kJ/kg)
h_{2s} =entalpi uap outlet pada kondisi ekspansi isentropik (kJ/kg)

Data tekanan dan temperatur inlet turbin diperoleh dari rata-rata pengukuran sisi kiri dan kanan turbin (*Pin Left*, *Pin Right*, *Tin Left*, dan *Tin Right*), sedangkan kondisi outlet diperoleh dari parameter *Pout TRB* dan *Tout TRB* yang terekam pada sistem DCS. Nilai entalpi ditentukan menggunakan *steam table* berdasarkan data tekanan dan temperatur operasi, dengan asumsi proses ekspansi berlangsung secara isentropik ($s_1 = s_{2s}$). Nilai efisiensi yang digunakan merupakan nilai rata-rata selama periode pengamatan sebelum dan sesudah *Turn Around*. Peningkatan efisiensi menunjukkan berkurangnya kehilangan energi selama proses ekspansi uap dan meningkatnya kemampuan turbin dalam mengonversi energi termal menjadi energi mekanik [13][14] [15].

Selain efisiensi turbin, penelitian ini juga menggunakan *pressure ratio* sebagai parameter pendukung untuk mengevaluasi kondisi ekspansi uap pada turbin. *Pressure ratio* dihitung menggunakan persamaan (4) [13].

$$Pressure\ Ratio = \frac{P_{in}}{P_{out}} \quad (4)$$

dimana:
P_{in} = tekanan absolut inlet turbin (bara)
P_{out} = tekanan outlet turbin (bara).

Analisis Kinerja *Condenser*

Kinerja *condenser* dievaluasi menggunakan parameter tekanan kondensor (*condenser pressure*) dan selisih temperatur kondensor (ΔT *condenser*). Tekanan kondensor digunakan untuk menggambarkan kondisi vakum sistem kondensasi, sedangkan ΔT *condenser* digunakan untuk mengevaluasi kemampuan perpindahan panas yang terjadi pada kondensor. Nilai ΔT *condenser* dihitung menggunakan persamaan (5) [16].

$$\Delta T_{CND} = T_{out} - T_{in} \quad (5)$$

dimana:
T_{out}= temperatur keluar *condenser* (°C)
T_{in} = temperatur masuk *condenser* (°C)
Data tekanan dan temperatur *condenser* diperoleh dari sistem *Distributed Control System* (DCS) pembangkit. Nilai yang digunakan dalam analisis merupakan nilai rata-rata operasi selama periode pengamatan sebelum dan sesudah TA. Penurunan tekanan *condenser* menunjukkan perbaikan kondisi vakum sistem, sedangkan peningkatan ΔT *condenser* yaitu mengindikasikan peningkatan kemampuan perpindahan panas pada proses kondensasi [13].

Analisis Efektivitas *Cooling Tower*

Efektivitas *cooling tower* digunakan untuk mengevaluasi kemampuan sistem pendingin dalam menurunkan temperatur air sirkulasi melalui proses perpindahan panas dan massa. Perhitungan efektivitas dilakukan menggunakan persamaan berikut [17][18].

$$Range = T_{in} - T_{out} \quad (6)$$

$$Approach = T_{out} - T_{WB} \quad (7)$$

$$N_{CT} = \frac{Range}{Range+Approach} \times 100\% \quad (8)$$

dimana:
T_{in} = temperatur air masuk *cooling tower* (°C)
T_{out} = temperatur air keluar *cooling tower* (°C)
T_{WB} = temperatur *wet bulb* lingkungan (°C)
η_{CT} = efektivitas *cooling tower* (%)

Analisis Keandalan Peralatan

a) *Mean Time Between Failure* (MTBF)

Mean Time Between Failure (MTBF) digunakan untuk menunjukkan rata-rata waktu operasi sistem di antara dua kejadian kegagalan berturut-turut dan merupakan salah satu indikator utama yang digunakan untuk mengevaluasi tingkat keandalan peralatan. Semakin tinggi nilai MTBF menunjukkan semakin baik kemampuan sistem untuk beroperasi tanpa mengalami gangguan [19][20].

$$MTBF = \frac{Operating\ Time}{Number\ of\ Failures} \quad (9)$$

dimana:

MTBF	=	rata-rata waktu antar kegagalan (jam)
Operating Time	=	total waktu operasi (jam)
Number of Failure	=	jumlah kejadian kegagalan

b) Mean Time To Repair (MTTR)

Mean Time To Repair (MTTR) digunakan untuk menunjukkan rata-rata waktu yang diperlukan untuk melakukan perbaikan setelah terjadi kegagalan pada peralatan. Nilai MTTR yang lebih rendah menunjukkan proses pemulihan sistem yang lebih cepat dan tingkat *maintainability* yang lebih baik [20].

$$MTTR = \frac{Repair\ Time}{Number\ of\ Repairs} \quad 10)$$

dimana:

MTTR	=	rata-rata waktu perbaikan (jam)
Repair Time	=	total waktu perbaikan (jam)
Number of Repair	=	jumlah kejadian perbaikan

c) *Availability*

Ketersediaan (*availability*) merupakan parameter yang menunjukkan probabilitas suatu sistem berada dalam kondisi siap beroperasi pada waktu tertentu. Nilai *availability* dipengaruhi oleh tingkat keandalan (*reliability*) dan kemudahan perbaikan (*maintainability*) suatu sistem [21].

$$Availability = \frac{MTBF}{MTBF+MTTR} \times 100\% \quad 11)$$

dimana:

Availability = Tingkat ketersediaan operasi (%)
MTBF = rata-rata waktu antar kegagalan (jam)
MTTR = rata-rata waktu perbaikan (jam)

d) *Equivalent Availability Factor* (EAF)

Equivalent Availability Factor (EAF) merupakan parameter yang digunakan untuk mengevaluasi tingkat ketersediaan kapasitas pembangkit dalam menghasilkan energi listrik. Semakin tinggi nilai EAF menunjukkan semakin tinggi tingkat kesiapan unit pembangkit untuk beroperasi dan semakin kecil kehilangan kapasitas akibat gangguan maupun kegiatan pemeliharaan [22].

$$EAF = \frac{PH-EFDH-EPDH-EMDH}{PH} \times 100\% \quad (12)$$

dimana:

PH = *Period Hours* (jam)
EFDH = *Equivalent Forced Derated Hours* (jam)
EPDH = *Equivalent Planned Derated Hours* (jam)
EMDH = *Equivalent Maintenance Derated Hours* (jam)

e) *Equivalent Forced Outage Rate* (EFOR)

Equivalent Forced Outage Rate (EFOR) merupakan indikator keandalan yang digunakan untuk menunjukkan tingkat ketidaktersediaan pembangkit akibat gangguan paksa (*forced outage*) dan kehilangan kapasitas pembangkitan selama periode operasi. Nilai EFOR menggambarkan probabilitas unit pembangkit tidak mampu menghasilkan daya sesuai kapasitas yang direncanakan karena adanya gangguan peralatan atau sistem pembangkitan [22].

$$EFOR = \frac{FOH+EFDH}{SH+FOH+EFDH} \times 100\% \quad (13)$$

dimana:

FOH = *Forced Outage Hours* (jam)
EFDH = *Equivalent Forced Derated Hours* (jam)
SH = *Service Hour* (jam)

Analisis Ekonomi

Analisis ekonomi pada penelitian ini difokuskan pada evaluasi dampak finansial operasional yang diperoleh dari peningkatan efisiensi dan keandalan pembangkit setelah pelaksanaan *Turn Around*. Analisis investasi jangka panjang tidak menjadi ruang lingkup penelitian ini, sehingga pembahasan dibatasi pada perubahan produksi energi, *Capacity Factor*, *Cost of Downtime* dan *Revenue*. Analisis tersebut bertujuan menggambarkan perubahan kinerja ekonomi operasional pembangkit sebelum dan sesudah pelaksanaan *Turn Around*.

a) Analisis Produksi Energi

Produksi energi net dihitung berdasarkan daya rata-rata pembangkit dan waktu operasi aktual. Energi listrik yang dihasilkan merupakan hasil perkalian antara daya keluaran pembangkit dan durasi operasi selama periode tertentu [13].

$$E = P \times t \quad (14)$$

dimana:

E = energi listrik (kWh)
P = daya pembangkit (kW)
t = waktu operasi (jam)

b) Analisis *Capacity Factor*

Capacity Factor digunakan untuk mengevaluasi tingkat pemanfaatan kapasitas pembangkit selama periode operasi tertentu. Parameter ini

menunjukkan perbandingan antara energi aktual yang dihasilkan terhadap energi maksimum yang dapat diproduksi pada kapasitas terpasang [23].

$$CF = \frac{E_{aktual}}{P_{terpasang} \times t} \times 100\% \quad (15)$$

dimana:

CF = *Capacity Factor* (%)
E_{aktual} = energi aktual yang dihasilkan (kWh)
$P_{terpasan,}$ = kapasitas terpasang pembangkit (kW)
t = Waktu operasi (jam)

c) Analisis *Cost of Downtime*

Kerugian ekonomi akibat gangguan operasi dihitung berdasarkan kehilangan produksi energi selama periode *downtime*. Nilai kerugian diperoleh dari hasil perkalian energi yang hilang dengan tarif penjualan energi listrik yang berlaku [24].

$$Cost\ of\ Downtime = E_{loss} \times Tarif \quad (16)$$

dimana:

Cost of Downtime = biaya kerugian ekonomi (Rp)
E_{loss} = Energi yang tidak terproduksi akibat *downtime* (kWh)
Tarif = harga jual energi listrik sesuai PJBL(USD/kWh)

d) *Revenue* Pendapatan Energi

Evaluasi pendapatan pembangkit dilakukan dengan menghitung nilai ekonomi dari energi listrik net yang berhasil diproduksi dan dijual ke sistem. Perhitungan dilakukan menggunakan tarif penjualan listrik yang berlaku selama periode pengamatan [13].

$$Revenue = E_{net} \times Tarif \quad (17)$$

dimana:

Revenue = pendapatan penjualan energi listrik
E_{net} = energi net yang dijual
Tarif = harga jual energi listrik sesuai PJBL yang berlaku

Pendapatan penjualan energi listrik dihitung berdasarkan energi net yang dihasilkan selama periode pengamatan dan tarif jual listrik yang berlaku berdasarkan Amandemen II Perjanjian Jual Beli Tenaga Listrik (PJBL) PLTP Kamojang Unit 4 sebesar USD 0,094/kWh. Tarif tersebut diasumsikan tetap pada periode sebelum dan sesudah *Turn Around*. Untuk tujuan perbandingan ekonomi operasional, konversi nilai dilakukan menggunakan kurs asumsi sebesar Rp16.000/USD yang diterapkan secara konsisten pada seluruh periode pengamatan.

Hasil dan Pembahasan

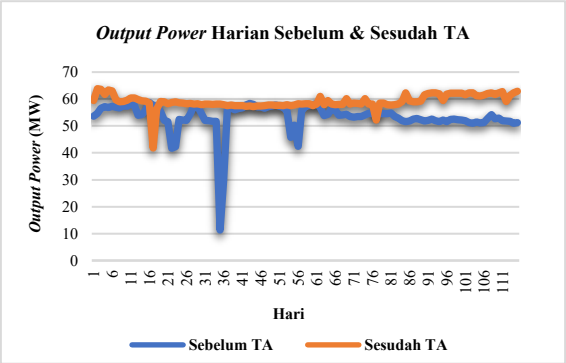
Penelitian ini mengevaluasi dampak pelaksanaan *Turn Around* terhadap kinerja teknis, keandalan, dan kinerja ekonomi pembangkit. Analisis dilakukan terhadap data operasi aktual sebelum dan sesudah *Turn Around* pada *critical equipment* yang meliputi turbin, *condenser*, dan *cooling tower*. Hasil evaluasi menunjukkan adanya peningkatan signifikan pada parameter efisiensi, keandalan, produksi energi, serta indikator ekonomi pembangkit. Temuan ini mengindikasikan bahwa kegiatan *Turn Around* berhasil mengembalikan kondisi operasi peralatan mendekati performa desain serta meningkatkan utilisasi pembangkit secara keseluruhan.

Pengaruh *Turn Around terhadap Output Power* dan Efisiensi Turbin

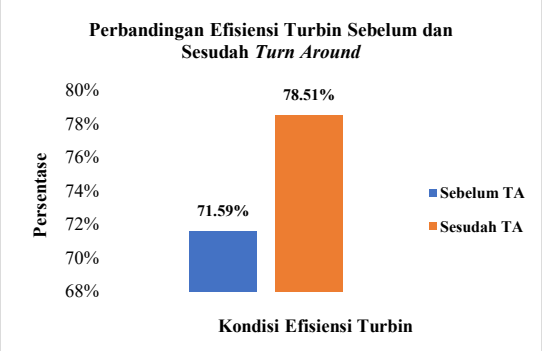
Daya keluaran (*output power*) merupakan indikator utama keberhasilan pelaksanaan *Turn Around* karena secara langsung menggambarkan kemampuan pembangkit dalam mengonversi energi panas bumi menjadi energi listrik. Hasil pengolahan data menunjukkan bahwa daya keluaran rata-rata PLTP Kamojang Unit 4 meningkat dari 53,44 MW menjadi 59,19 MW setelah pelaksanaan *Turn Around*. Selain itu, efisiensi turbin meningkat dari 71,59% menjadi 78,51%.

Gambar 2. menunjukkan peningkatan kinerja turbin setelah

pelaksanaan *Turn Around*. Kenaikan *output power* sebesar 10,76% menunjukkan bahwa energi panas bumi dapat dikonversi menjadi energi listrik secara lebih efektif. Peningkatan ini dihasilkan dari perbaikan komponen kritis turbin seperti *seal*, *bucket*, *nozzle*, dan sistem distribusi uap yang mengurangi kehilangan energi selama proses ekspansi.



(a)



(b)

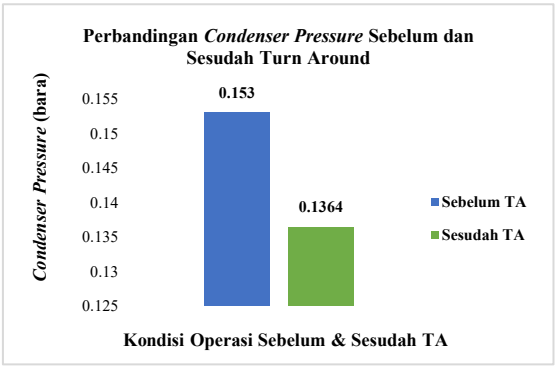
Gambar 2. (a) Perbandingan Output Power Sebelum dan Sesudah *Turn Around*; (b) Perbandingan Efisiensi Turbin Sebelum dan Sesudah *Turn Around*.

Efisiensi turbin meningkat menjadi 78,51% yang menunjukkan bahwa proses ekspansi uap semakin mendekati kondisi ideal (isentropik). Hasil ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa peningkatan kondisi turbin dan sistem vakum dapat memberikan kontribusi signifikan terhadap peningkatan keluaran daya pembangkit panas bumi [15]. Temuan ini juga sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa kegiatan *overhaul* pada PLTP Kamojang Unit 4 mampu meningkatkan efisiensi siklus termal melalui perbaikan kondisi operasi dan performa sistem pembangkitan [11].

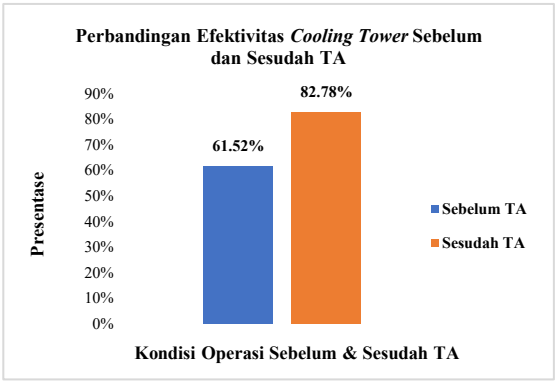
Peningkatan *pressure ratio* dari 66,50 menjadi 74,67 menunjukkan bahwa selisih tekanan antara sisi inlet dan outlet turbin menjadi lebih besar. Kondisi tersebut memperbesar rentang ekspansi uap selama proses pembangkitan sehingga energi yang dapat dikonversi menjadi kerja mekanik meningkat dan berkontribusi terhadap kenaikan *output power* setelah pelaksanaan *Turn Around*.

Analisis Performa *Condenser* dan *Cooling Tower*

Performa *condenser* dan *cooling tower* memegang peranan penting dalam siklus PLTP karena menentukan besarnya tekanan buang turbin. Sistem pendingin yang bekerja optimal mampu menghasilkan tekanan vakum lebih rendah sehingga meningkatkan efisiensi turbin.



(a)



(b)

Gambar 3. (a) Perbandingan *Condenser Pressure* Sebelum dan Sesudah TA; (b) Perbandingan Efektivitas *Cooling Tower* Sebelum dan Sesudah TA.

Berdasarkan Gambar 3 terlihat bahwa efektivitas *cooling tower* meningkat signifikan dari 61,52% menjadi 82,78%, sementara tekanan kondensor turun dari 0,153 bara menjadi 0,136 bara.

Fouling pada *cooling tower* dapat menyebabkan penurunan efektivitas pendinginan yang berdampak langsung pada meningkatnya temperatur air sirkulasi dan menurunnya efisiensi sistem pembangkit [25]. Peningkatan efektivitas *cooling tower* menunjukkan bahwa sistem pendingin memiliki kemampuan lebih baik dalam membuang panas ke lingkungan setelah dilaksanakan penggantian *fill material*, pembersihan distribusi air, dan perbaikan sistem sirkulasi. Kondisi tersebut menyebabkan temperatur air pendingin yang masuk ke kondensor lebih rendah sehingga proses kondensasi berlangsung lebih efektif.

Penurunan performa perpindahan panas pada heat exchanger akibat fouling dapat meningkatkan temperatur operasi dan menurunkan efisiensi sistem, sehingga perbaikan kondisi perpindahan panas setelah pemeliharaan berkontribusi langsung terhadap peningkatan performa kondensor [26].

Selain meningkatkan efektivitas perpindahan panas, penurunan tekanan kondensor menghasilkan penurunan *back pressure* turbin sehingga memperbesar energi ekspansi uap yang tersedia untuk menghasilkan daya listrik. Temuan ini konsisten dengan penelitian yang menunjukkan bahwa peningkatan performa sistem pendingin memiliki dampak langsung terhadap efisiensi pembangkit panas bumi [16].

Analisis Keandalan

Tabel 2. Hasil Analisis Keandalan.

Parameter	Sebelum TA	Sesudah TA
MTBF (jam)	1.236,93	2.916,40
MTTR (jam)	14,50	3,60
EAF (%)	95,97	99,84
EFOR (%)	3,15	0,28

Tabel 2 menunjukkan bahwa nilai MTBF meningkat secara signifikan dari 1.236,93 jam menjadi 2.916,40 jam. Hal ini menunjukkan bahwa interval antar gangguan menjadi lebih panjang setelah pelaksanaan *Turn Around*.

Peningkatan nilai MTBF menunjukkan bahwa probabilitas kegagalan peralatan selama periode operasi semakin rendah sehingga tingkat keandalan sistem meningkat [27].

Sebaliknya, MTTR turun dari 14,50 jam menjadi 3,60 jam. Penurunan ini menunjukkan bahwa apabila terjadi gangguan, sistem dapat dipulihkan dalam waktu yang jauh lebih singkat dibandingkan sebelum *Turn Around*.

Nilai MTTR yang rendah menunjukkan kemampuan pemeliharaan (*maintainability*) yang baik karena sistem dapat dikembalikan ke kondisi operasi normal dalam waktu yang lebih singkat [21].

Nilai EAF meningkat dari 95,97% menjadi 99,84%, sedangkan EFOR turun dari 3,15% menjadi 0,28%. Peningkatan EAF menunjukkan bahwa unit pembangkit memiliki tingkat kesiapan operasi yang lebih tinggi setelah *Turn Around*. Sementara itu penurunan EFOR menunjukkan bahwa kehilangan produksi akibat *forced outage* berhasil ditekan secara signifikan.

Peningkatan ketersediaan sistem dan penurunan gangguan paksa berpengaruh langsung terhadap peningkatan produktivitas sistem tenaga listrik [28]. Hasil ini juga sejalan dengan konsep *reliability* and *risk assessme*nt yang menjelaskan bahwa penurunan frekuensi gangguan akan meningkatkan *availability* dan performa keseluruhan sistem [29].

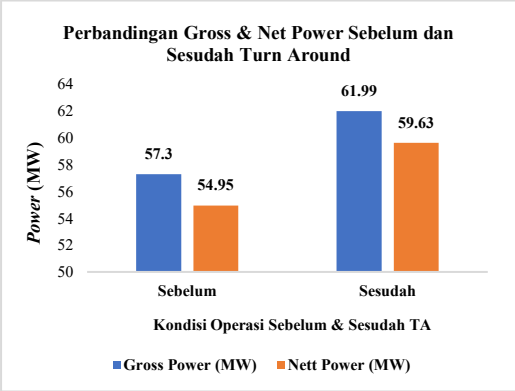
Analisis Dampak Ekonomi

Pelaksanaan *Turn Around* tidak hanya meningkatkan performa teknis dan keandalan pembangkit, tetapi juga memberikan dampak ekonomi yang signifikan. Peningkatan efisiensi turbin, perbaikan sistem pendingin, serta meningkatnya keandalan operasi berkontribusi langsung terhadap peningkatan produksi energi, pemanfaatan

kapasitas pembangkit, penurunan kerugian akibat gangguan operasi, dan peningkatan pendapatan perusahaan. Evaluasi ekonomi dilakukan menggunakan indikator produksi energi net, *capacity factor*, *cost of downtime* dan *revenue.*

a) Produksi Energi

Produksi energi *gross* merupakan total energi listrik yang dihasilkan generator, sedangkan energi *net* merupakan energi yang dapat disalurkan ke jaringan setelah dikurangi pemakaian sendiri (*auxiliary consumption*) pembangkit.



Gambar 4. Perbandingan Rata-Rata Produksi *Gross* dan *Net Power* Sebelum dan Sesudah *Turn Around.*

Berdasarkan gambar 4, rata-rata daya pembangkitan mengalami peningkatan setelah pelaksanaan *Turn Around*. Nilai *Gross Power* meningkat dari 57,30 MW menjadi 61,99 MW, sedangkan *Net Power* meningkat dari 54,95 MW menjadi 59,63 MW. Peningkatan tersebut menunjukkan bahwa kemampuan pembangkit dalam menghasilkan daya listrik mengalami perbaikan sebagai akibat dari membaiknya performa turbin dan sistem pembangkitan.

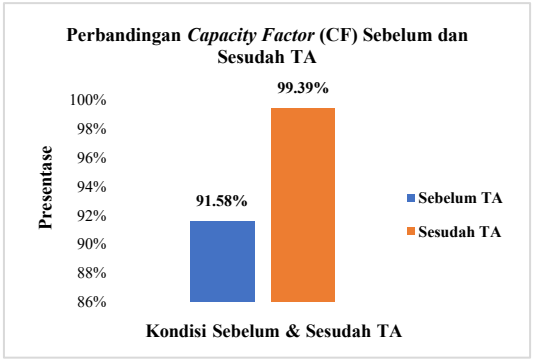
Peningkatan daya rata-rata tersebut berkontribusi terhadap kenaikan produksi energi listrik tahunan. Energi gross meningkat dari 501,91 GWh menjadi 543,00 GWh, sedangkan energi net meningkat dari 481,36 GWh menjadi 522,38 GWh setelah pelaksanaan *Turn Around*. Kondisi ini menunjukkan bahwa manfaat *Turn Around* tidak hanya meningkatkan kemampuan pembangkit dalam menghasilkan daya, tetapi juga meningkatkan energi listrik yang dapat disalurkan ke sistem.

Dalam evaluasi *techno-economic*, peningkatan produksi energi merupakan salah satu indikator penting karena mencerminkan peningkatan utilisasi aset dan kemampuan pembangkit dalam menghasilkan nilai ekonomi dari sumber daya yang tersedia [30].

Peningkatan produksi energi setelah pelaksanaan *Turn Around* menunjukkan bahwa strategi pemeliharaan yang efektif mampu meningkatkan utilisasi aset dan produktivitas pembangkit melalui pengurangan gangguan operasi dan peningkatan waktu operasi unit [31].

b) *Capacity Factor* (CF)

Capacity Factor menunjukkan tingkat pemanfaatan kapasitas terpasang pembangkit selama periode operasi.



Gambar 5. *Capacity Factor* Sebelum dan Sesudah *Turn Around.*

Nilai *capacity factor* meningkat dari 91,58% menjadi 99,39%. Hasil ini menunjukkan bahwa setelah pelaksanaan *Turn Around* pembangkit mampu beroperasi mendekati kapasitas terpasangnya selama periode evaluasi. Nilai tersebut mengindikasikan peningkatan utilisasi aset pembangkit yang signifikan dan mencerminkan keberhasilan program pemeliharaan dalam meningkatkan kesiapan operasi unit.

c) *Cost of Downtime*

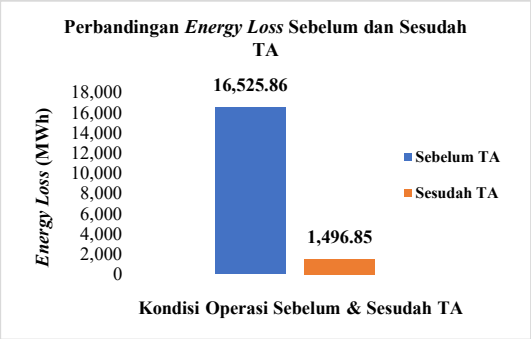
Cost of Downtime digunakan untuk menghitung kerugian ekonomi akibat

hilangnya produksi energi selama unit mengalami gangguan operasi.

Tabel 3. *Cost of Downtime* Sebelum dan Sesudah *Turn Around.*

Parameter	Sebelum TA	Sesudah TA
Cost of Downtime (Rp miliar)	24,85	2,25

Hasil analisis menunjukkan bahwa *cost of downtime* turun secara signifikan dari Rp24,85 miliar menjadi Rp2,25 miliar. Penurunan sebesar 90,94% ini menunjukkan bahwa kehilangan produksi energi akibat gangguan operasi berhasil ditekan setelah pelaksanaan *Turn Around*. Penurunan *cost of downtime* menunjukkan bahwa berkurangnya durasi dan frekuensi gangguan operasi memberikan dampak langsung terhadap pengurangan kerugian produksi energi dan peningkatan kinerja ekonomi pembangkit [32]



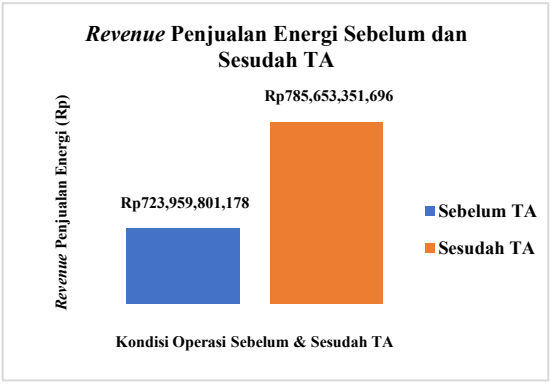
Gambar 6. Perbandingan *Energy Loss* Sebelum dan Sesudah *Turn Around*.

d) *Revenue* Penjualan Energi

Pendapatan penjualan energi listrik dihitung berdasarkan energi net yang dihasilkan selama periode pengamatan dan tarif jual listrik yang berlaku berdasarkan Amandemen II Perjanjian Jual Beli Tenaga Listrik (PJBL) PLTP Kamojang Unit 4 sebesar 9,4 US cents/kWh atau USD 0,094/kWh [33]. Dalam penelitian ini, tarif tersebut diasumsikan tetap pada periode sebelum dan sesudah *Turn Around*. Nilai pendapatan dalam Rupiah diperoleh melalui konversi menggunakan kurs asumsi sebesar Rp16.000/USD yang diterapkan secara konsisten pada seluruh perhitungan.

Tabel 4. *Revenue* Penjualan Energi Sebelum dan Sesudah *Turn Around.*

Parameter	Sebelum TA	Sesudah TA
Energi Net (GWh)	481.356	522.375
Tarif (USD/kWh)	0,094	0,094
Kurs (Rp/USD)	16.000	16.000
Revenue (Rp miliar)	723.959	785.653



Gambar 7. *Revenue* Sebelum dan Sesudah *Turn Around*.

Berdasarkan hasil penelitian, *gross incremental revenue* meningkat dari Rp 723,96 miliar menjadi Rp 785,65 miliar atau bertambah sebesar Rp 61,69 miliar per tahun. Peningkatan tersebut berasal dari bertambahnya produksi energi yang dapat dijual ke sistem serta meningkatnya faktor kapasitas pembangkit. Kenaikan pendapatan ini menunjukkan bahwa pelaksanaan *Turn Around* memberikan manfaat ekonomi yang nyata dan mampu meningkatkan nilai bisnis aset pembangkit.

Dari perspektif *techno-economic evaluation*, peningkatan pendapatan yang diperoleh setelah pelaksanaan *Turn Around* menunjukkan bahwa investasi pemeliharaan mampu menghasilkan nilai tambah melalui peningkatan produktivitas, utilisasi aset, dan efisiensi operasi pembangkit [12]

Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian, pelaksanaan *Turn Around* (TA) pada *critical equipment* PLTP Kamojang Unit 4 memberikan dampak positif terhadap kinerja teknis, keandalan operasi, produktivitas energi dan kinerja ekonomi pembangkit. Dari aspek teknis, setelah pelaksanaan TA terjadi peningkatan *output power* dari 53,44 MW menjadi 59,19 MW atau sebesar 10,76%, serta peningkatan efisiensi turbin dari 71,59% menjadi 78,51%. Perbaikan performa juga ditunjukkan oleh peningkatan kinerja sistem kondensasi dan pendinginan, dengan tekanan *condenser* menurun dari 0,153 bara menjadi 0,136 bara, nilai ΔT *condenser* meningkat dari 22,51°C menjadi 29,91°C, dan efektivitas *cooling tower* meningkat dari 61,52% menjadi 82,78%.

Dari aspek keandalan, pelaksanaan TA meningkatkan reliabilitas operasi pembangkit secara signifikan. Nilai MTBF meningkat dari 1.236,93 jam menjadi 2.916,40 jam atau sebesar 135,78%, sedangkan MTTR menurun dari 14,50 jam menjadi 3,60 jam atau sebesar 75,17%. Selain itu, EAF meningkat dari 95,97% menjadi 99,84%, sementara EFOR menurun dari 3,15% menjadi 0,28%. Peningkatan kinerja teknis dan keandalan tersebut berdampak pada produktivitas pembangkit, yang ditunjukkan oleh peningkatan produksi energi net sebesar 8,52%, dari 481,36 GWh menjadi 522,38 GWh, serta peningkatan *Capacity Factor* dari 91,58% menjadi 99,39%.

Dari aspek ekonomi, pelaksanaan TA mampu menurunkan *Cost of Downtime* sebesar 90,94%, dari Rp 24,85 miliar menjadi Rp 2,25 miliar, serta meningkatkan gross incremental revenue sebesar Rp 61,69 miliar per tahun. Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa *Turn Around* tidak hanya berperan dalam memulihkan dan meningkatkan performa *critical equipment*, tetapi juga meningkatkan keandalan dan produktivitas operasi serta memberikan manfaat ekonomi yang signifikan. Oleh karena itu, pelaksanaan *Turn Around* dapat menjadi strategi pemeliharaan yang efektif untuk menjaga keberlanjutan dan optimalisasi kinerja PLTP dalam jangka panjang.

Referensi

[1] Ministry of Energy and Mineral Resources of Indonesia, “Indonesia Energy Outlook 2025,” Jakarta, 2020.

[2] PT PLN (Persero), “RUPTL PLN 2025–2034,” Jakarta, 2025.

[3] E. Suryani, A. Hidayat, and R. Prasetyo, “Exploring the Viability of Geothermal Power Plant Development in Indonesia from Economic and Environmental Perspectives,” *Environ. Dev. Sustain.*, vol. 27, 2025.

[4] I. Kardani, B. Santoso, and A. Purdanto, “Optimizing Power Generation in Patuha Geothermal Field: An Integrated Approaches to Field Management for Optimum Capacity and Reliability,” Standford, California: Stanford University, 2024.

[5] A. Şimşek and A. G. Çelik, “Thermoeconomic and Environmental Impact Analysis of a Binary Geothermal Power Plant,” *Energies (Basel).*, vol. 19, no. 3, p. 611, 2026.

[6] M. A. H. Al-Masri and A. Al-Khawaja, “Performance Evaluation of Geothermal Power Plants Using Critical Equipment Indicators,” *Energy Reports*, vol. 8, pp. 10234–10245, 2022.

[7] J. H. Lee and K. Y. Park, “Economic Assessment of Preventive Maintenance Strategies in Renewable

Power Plants," *Renew. Energy*, vol. 180, pp. 1201–1212, 2021.
[8] D. E. Nataprawira and Zulkarnain, "Determining Optimum Maintenance Interval of Critical Equipment in Geothermal Power Plant Based on Reliability Value and Cost Ratio," in *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management (IEOM)*, 2023.
[9] M. R. H. Nugraha, S. Widodo, and T. Santoso, "Reliability-Centered Maintenance for Geothermal Power Plant Equipment: Case Study in Indonesia," *Journal of Energy Engineering*, vol. 149, no. 4, p. 04023025, 2023.
[10] A. Belayneh, "Evaluation of Maintenance Management Through Benchmarking in Geothermal Power Plants," *International Journal of Energy Engineering*, vol. 12, no. 2, pp. 45–56, 2025.
[11] P. Suparmin, P. Gloria Gani, and N. Firdaus, "The Effect of Mass Fraction on the Thermal Cycle Efficiency of the PGE Kamojang IV Geothermal Power Plant Before and After Overhaul," in *International Conference on Advanced Technologies in Energy and Informatic (ICATEI)*, IEEE, 2025, pp. 522–527.
[12] R. Shortall, B. Davison, M. Rogan, and J. Doran, "Techno-Economic Evaluation of Energy Systems: Methodologies and Applications," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 144, 2021.
[13] Ronald. DiPippo, *Geothermal Power Plants: Principles, Applications, Case Studies and Environmental Impact*, 4th Edition. Oxford, UK: Woodhead Publishing is an imprint of Elsevier, 2016.
[14] Y. A. Çengel and M. A. Boles, *Thermodynamics: An Engineering Approach*. McGraw-Hill, 2019.
[15] S. J. Zarrouk and H. Moon, "Efficiency of Geothermal Power Plants: A Worldwide Review," *Geothermics*, vol. 51, pp. 142–153, 2014.
[16] H. Li, J. Wang, and X. Chen, "Performance Degradation Analysis of Steam Turbines in Power Plants," *Energy Convers. Manag.*, 2021.
[17] M. J. Moran, H. N. Shapiro, D. D. Boettner, and M. B. Bailey, *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*, 9th Edition. Wiley, 2018.
[18] H. Zhang, Y. Liu, X. Chen, and J. Wang, "Performance Analysis of Cooling Towers Under Varying Environmental Conditions," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 210, 2022.
[19] A. Kumar, R. Sharma, and V. Singh, "Impact of Maintenance on Power Plant Performance," *Impact of Maintenance on Power Plant Performance*, 2020.
[20] M. Islam, A. Rahman, and S. Hossain, "Reliability and Availability Analysis in Power Generation Systems," *Energy*, vol. 198, 2020.
[21] C. E. Ebeling, *Reliability and Maintainability Engineering*. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2019.
[22] IEEE, "IEEE Standard Definitions for Reporting Electric Generating Unit Reliability, Availability, and Productivity (IEEE Std 762-2022)," New York, NY, 2022.
[23] International Energy Agency, "Geothermal Energy Technology Brief," Paris, France, 2020.
[24] K. Khasani, G. A. M. Ashfani, V. A. Brilian, R. Hosnand, L. R. Siregar, and T. Warsokusumo, "Techno-economic analysis of an add-on geothermal power plant to utilise exhaust geothermal steam from a back-pressure turbine: a case study in Ulumbu geothermal field, Indonesia," *International Journal of*

Sustainable Energy, vol. 44, no. 1, 2025.
[25] M. Lucas, R. Patel, S. Kumar, and J. Thompson, “Cooling Tower Fouling and Performance Degradation,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 245, 2021.
[26] H. Zhang, Y. Liu, X. Chen, and J. Wang, “Performance Evaluation of Heat Exchangers Considering Fouling Effects,” *Appl. Energy*, vol. 331, 2023.
[27] A. Birolini, *Reliability Engineering: Theory and Practice*. Berlin, Germany: Springer, 2017.
[28] H. Li, Y. Wang, and J. Zhao, “Reliability Assessment of Power Systems,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 181234–181245, 2019.
[29] J. D. Andrews and T. R. Moss, *Reliability and Risk Assessment*. Chichester, UK: Wiley, 2016.
[30] R. Shortall, S. Davidsdottir, and G. Axelsson, “Geothermal Energy for Sustainable Development: A Review of Sustainability Impacts and Assessment Frameworks,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 144, 2021.
[31] Y. Al-Douri, M. H. Mohammed, and A. H. Reshak, “Maintenance Optimization in Power Plants,” *Energy*, vol. 172, pp. 1054–1065, 2019.
[32] A. Kumar, R. Sharma, P. Verma, and S. Patel, “Downtime Impact on Power Plant Performance,” *Energy Reports*, vol. 6, pp. 245–253, 2020.
[33] PT Pertamina Geothermal Energy and PT PLN (Persero), “Perjanjian Jual Beli Tenaga Listrik untuk PLTP Kamojang,” Jakarta, Mar. 2011.