

## ***Integrating Life Cycle Management and Risk Assessment for Enhanced Investment in Power Plant Equipment Maintenance***

### **[Mengintegrasikan Manajemen Siklus Hidup dan Penilaian Risiko untuk Peningkatan Investasi dalam Pemeliharaan Peralatan Pembangkit Listrik]**

Anggara Ibnu Sidharta L<sup>1)</sup>, Rita Ambarwati Sukmono<sup>\*2)</sup>

<sup>1)</sup>Program Studi Magister Manajemen, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

<sup>2)</sup>Program Studi Magister Manajemen, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

\*Email Penulis Korespondensi: [ritaambarwati@umsida.ac.id](mailto:ritaambarwati@umsida.ac.id)

**Abstract.** *Investment decision-making in the power generation sector faces significant challenges due to technical risks and declining operational efficiency. This research is urgent because there is no integrative model that systematically combines technical and financial approaches in determining investment feasibility, particularly for critical components such as the Blade Turbine Row 14 at PLTU XYZ. The objective of this study is to identify dominant risk factors and assess investment feasibility based on historical data and asset life cycle analysis. The research method employs a concurrent mixed methods approach by integrating quantitative analysis (Pareto Loss, Failure Mode, LCM) with qualitative insights (FGD, technical observation), and validated through triangulation of source, time, and method. Results show that Mech-Looseness and Deformation are the main causes of derating, reaching up to 700 hours, decreasing efficiency, and increasing NPHR. Financially, however, the investment of Rp5.95 billion is considered highly feasible, with an NPV of Rp54.97 billion, IRR of 164%, Payback Period of 1 year, and a B/C ratio of 16.44. This study offers strategic value by demonstrating that implementing Life Cycle Management (LCM) integrated with Failure Mode and Pareto Loss can improve investment decision accuracy, extend asset lifespan, and strengthen operational efficiency and sustainability of the power plant.*

**Keywords:** – *Life Cycle Management, Pareto Loss, Blade Turbine, Power Plant Investment, EAF, EFOR, NPHR*

**Abstrak.** *Pengambilan keputusan investasi di sektor pembangkit listrik menghadapi tantangan besar akibat risiko teknis dan efisiensi operasional yang menurun. Penelitian ini menjadi urgensi karena belum adanya model integratif yang menggabungkan pendekatan teknis dan finansial secara sistematis dalam menentukan kelayakan investasi, khususnya untuk komponen kritis seperti Blade Turbine Row 14 di PLTU XYZ. Tujuan penelitian adalah mengidentifikasi faktor risiko dominan dan menilai kelayakan investasi berbasis data historis dan analisis siklus hidup aset. Metode penelitian yang digunakan adalah concurrent mixed methods, dengan integrasi pendekatan kuantitatif (Pareto Loss, Failure Mode, LCM) dan kualitatif (FGD, observasi teknis), serta validasi melalui triangulasi sumber, waktu, dan metode. Hasil menunjukkan bahwa gangguan Mech-Looseness dan Deformation menjadi penyebab utama derating hingga 700 jam, menurunkan efisiensi dan menaikkan NPHR. Namun, secara finansial, investasi senilai Rp5,95 miliar dinyatakan sangat layak dengan NPV sebesar Rp54,97 miliar, IRR 164%, PP 1 tahun, dan rasio B/C 16,44. Penelitian ini memberi nilai strategis dengan membuktikan bahwa penerapan Life Cycle Management (LCM) yang terintegrasi dengan Failure Mode dan Pareto Loss dapat meningkatkan akurasi keputusan investasi, memperpanjang umur aset, serta memperkuat efisiensi dan keberlanjutan operasional PLTU.*

**Kata kunci:** - *Life Cycle Management, Pareto Loss, Blade Turbine, Investasi PLTU, EAF, EFOR, NPHR.*

## **I. PENDAHULUAN**

Investasi memegang peranan penting dalam mendorong pertumbuhan ekonomi dan keberlanjutan bisnis. Dalam lingkup global, kemampuan mengambil keputusan investasi yang tepat menjadi salah satu tantangan utama

yang dihadapi oleh banyak perusahaan [1]. Keputusan investasi yang strategis dapat menjadi motor penggerak utama dalam menciptakan nilai tambah dan memastikan stabilitas operasional [2].

Dinamika ekonomi dunia yang kompleks, sektor energi memiliki peran sentral karena merupakan fondasi bagi berbagai aktivitas ekonomi dan sosial. Namun, sektor ini juga menghadapi tantangan besar, seperti fluktuasi harga energi, regulasi, dan perubahan teknologi yang membuat pengambilan keputusan investasi menjadi semakin kompleks [3]. Pusat Listrik Tenaga Uap (PLTU) merupakan salah satu sumber energi yang masih mendominasi penyediaan listrik di Tanah Air. Meski demikian, sektor ini menghadapi berbagai tantangan, salah satunya keberlanjutan operasional.

PLTU XYZ yang berlokasi di Kalimantan Selatan, dengan kapasitas daya terpasang sebesar 460 MW, PLTU ini berperan sebagai salah satu tulang punggung sistem kelistrikan interkoneksi Kalimantan. Sebagai unit bisnis yang berada di bawah naungan Perusahaan Listrik Negara (PT. PLN PERSERO), PLTU XYZ menghadapi tantangan besar dalam memastikan efisiensi operasional dan keberlanjutan bisnisnya. Investasi yang dilakukan haruslah dapat memberikan kontribusi positif bagi profitabilitas, sekaligus mampu menjaga keberlanjutan lingkungan. Dalam pengelolaan investasi, salah satu tantangan utama yang dihadapi adalah menentukan prioritas investasi yang berdampak signifikan terhadap keberlanjutan dan efisiensi [4].

Sektor pembangkit listrik seperti PLTU XYZ dihadapkan pada berbagai risiko yang dapat memengaruhi hasil investasi, seperti fluktuasi harga bahan bakar, perubahan kebijakan pemerintah terkait emisi karbon, dan tekanan untuk beralih ke teknologi energi terbarukan. Selain itu, pengelolaan siklus hidup pembangkit yang kurang optimal dapat menyebabkan biaya pemeliharaan yang tinggi serta potensi kerusakan peralatan sebelum mencapai masa pakai yang seharusnya [5].

Pendekatan berbasis data dan analisis menjadi sangat relevan untuk mendukung pengambilan keputusan investasi. Salah satu pendekatan yang dapat diterapkan adalah *Pareto Loss*, yang berfokus pada prinsip 80/20. Dalam menghadapi tantangan ini, pendekatan berbasis data dan analisis menjadi sangat relevan untuk mendukung pengambilan keputusan investasi. Salah satu pendekatan yang dapat diterapkan adalah *Pareto Loss*, yang berfokus pada prinsip 80/20 [6]. Prinsip ini menunjukkan bahwa sebagian besar hasil atau dampak biasanya disebabkan oleh sebagian kecil faktor atau variabel. Dalam konteks investasi, *Pareto Loss* dapat membantu mengidentifikasi dan memprioritaskan faktor-faktor yang memberikan pengaruh paling besar terhadap keberhasilan atau kegagalan investasi. Dengan demikian, perusahaan dapat mengalokasikan sumber daya secara lebih efisien dan meminimalkan kerugian akibat keputusan yang kurang optimal [7].

**Failure Mode** adalah mekanisme kegagalan yang terjadi pada suatu sistem, subsistem dan komponen, ini digunakan untuk menggambarkan bagaimana suatu sistem atau peralatan dapat gagal berfungsi, termasuk jenis kegagalan yang dialami dan dampak yang ditimbulkannya pada sistem secara keseluruhan [8]. Dalam bidang pembangkitan, khususnya pada PT XYZ *Failure Mode* digunakan untuk mengidentifikasi suatu failur dan memitigasi kegagalan yang akan muncul serta berdampak pada system sehingga mengakibatkan suatu pembangkit mengalami downt time atau gagal beroperasi [9].

*Life Cycle Management (LCM)* juga menjadi pendekatan penting dalam pengelolaan aset di sektor energi. LCM berfokus pada pengelolaan aset secara berkelanjutan sepanjang siklus hidupnya, mulai dari tahap perencanaan hingga dekomisioning [10]. Pendekatan ini bertujuan untuk memastikan bahwa investasi memberikan nilai maksimal sepanjang masa operasionalnya, sekaligus mengurangi risiko biaya tambahan di masa mendatang. Dengan menerapkan *LCM*, perusahaan dapat mengoptimalkan penggunaan sumber daya, meningkatkan efisiensi operasional, dan menjaga keberlanjutan lingkungan [11].

PLTU XYZ menggabungkan konsep *Pareto Loss* dan *LCM* dapat menjadi strategi yang efektif untuk mengatasi berbagai tantangan yang ada. Dalam konteks ini, *Pareto Loss* dapat digunakan untuk mengidentifikasi faktor-faktor kunci yang paling memengaruhi keberhasilan investasi, seperti risiko teknis, biaya operasional, atau dampak regulasi [12]. Sementara itu, *LCM* dapat digunakan untuk memastikan bahwa aset pembangkit dikelola secara efisien sepanjang siklus hidupnya [13]. Kombinasi kedua pendekatan ini memberikan kerangka kerja yang komprehensif bagi pengelolaan investasi di sektor energi.

Penerapan konsep *Pareto Loss*, *Failure Mode* dan *LCM* diharapkan dapat memberikan solusi praktis dan strategis dalam pengelolaan investasi di UBP XYZ. Dengan menggunakan pendekatan yang sistematis,

perusahaan di sektor energi dapat beradaptasi dengan perubahan lingkungan bisnis, sekaligus memberikan kontribusi positif terhadap pembangunan berkelanjutan bagi PLTU XYZ sehingga kedepannya dapat memanfaatkan penerapan konsep *Pareto Loss*, *Failure Mode* dan *LCM* sebagai langkah strategis untuk meningkatkan daya saing dan keberlanjutan bisnisnya [14]. Melalui optimalisasi pengambilan keputusan investasi, perusahaan tidak hanya dapat mencapai efisiensi dan profitabilitas tetapi juga memastikan keberlanjutan operasional dalam jangka panjang. Pendekatan ini memberikan peluang bagi PLTU XYZ untuk menjadi model dalam pengelolaan investasi yang inovatif dan berkelanjutan di sektor energi.

Penelitian sebelumnya telah menggali penggunaan beberapa metode pengelolaan risiko seperti Bow-Tie, BIA, FMEA, dan Ekspansi Cornish-Fisher di sektor energi dan manufaktur, terutama di pembangkit listrik Indonesia dan selama krisis pandemi COVID-19. Akan tetapi, masih diperlukan penelitian lebih mendalam untuk memahami seberapa efektif metode-metode ini saat diaplikasikan di berbagai industri lain atau dalam skenario ekonomi yang beragam. Selanjutnya, penggunaan optimalitas Pareto dalam pengambilan keputusan, analisis terhadap penelitian terbaru telah dilakukan untuk mengidentifikasi hubungan antara LCA dan indikator sirkularitas. Manajemen risiko berbasis manajemen siklus hidup aset (LCM) adalah pendekatan strategis yang digunakan, di mana perusahaan mengontrol aset dan risiko yang dapat menghasilkan tindakan yang berdampak pada tujuan perusahaan sebelum memprioritaskan investasi untuk memperpanjang umur aset dan mengurangi risiko yang terkait dengan aset tersebut. Ini membuka jalan bagi penelitian yang lebih rinci yang bisa menguatkan dan memperluas aplikasi praktik-praktik ini untuk mendukung efisiensi dan keberlanjutan operasional yang lebih baik [15][16][17][18][19][11][13].

Berbeda dengan penelitian terdahulu, penelitian berfokus pada pengelolaan investasi di sektor energi melalui integrasi konsep Pareto Loss, Failure Mode dan Life Cycle Management (LCM), dengan studi kasus PLTU XYZ di Kalimantan Selatan. Penelitian ini menekankan pada pengambilan keputusan investasi strategis untuk memastikan efisiensi operasional dan keberlanjutan jangka panjang. Dengan pendekatan berbasis data, penelitian ini mengisi celah dalam literatur dengan mengaplikasikan prinsip Pareto, Failure Mode dan LCM dalam konteks sektor energi, sesuatu yang belum dibahas dalam penelitian sebelumnya.

#### **RUMUSAN MASALAH:**

1. Apa saja faktor dominan yang menyebabkan gangguan operasional (derating) pada Blade Turbine Row 14 di PLTU XYZ?
2. Bagaimana penerapan analisis Pareto Loss dan Failure Mode dapat mengidentifikasi akar penyebab kegagalan teknis pada Blade Turbine Row 14?
3. Sejauh mana pendekatan Life Cycle Management (LCM) dapat digunakan dalam pengambilan keputusan investasi pemeliharaan peralatan Blade Turbine?
4. Apakah investasi penggantian Blade Turbine Row 14 di PLTU XYZ layak secara teknis dan finansial berdasarkan parameter NPV, IRR, Payback Period, dan B/C Ratio?
5. Bagaimana integrasi pendekatan Pareto Loss, Failure Mode, dan LCM dapat meningkatkan efisiensi, keandalan operasional, dan keberlanjutan investasi pada PLTU XYZ?

#### **TUJUAN PENELITIAN:**

1. Mengidentifikasi faktor-faktor dominan yang menyebabkan gangguan operasional (derating) pada Blade Turbine Row 14 di PLTU XYZ.
2. Menganalisis kegagalan teknis Blade Turbine melalui pendekatan Pareto Loss dan Failure Mode Analysis.
3. Menerapkan pendekatan Life Cycle Management (LCM) sebagai dasar pengambilan keputusan investasi pemeliharaan peralatan Blade Turbine Row 14.
4. Menilai kelayakan investasi penggantian Blade Turbine secara teknis dan finansial menggunakan indikator NPV, IRR, Payback Period, dan Benefit-Cost Ratio.
5. Mengintegrasikan pendekatan Pareto Loss, Failure Mode, dan LCM untuk meningkatkan efisiensi, keandalan operasional, dan keberlanjutan investasi di PLTU XYZ.

Copyright © Universitas Muhammadiyah Sidoarjo. This preprint is protected by copyright held by Universitas Muhammadiyah Sidoarjo and is distributed under the Creative Commons Attribution License (CC BY). Users may share, distribute, or reproduce the work as long as the original author(s) and copyright holder are credited, and the preprint server is cited per academic standards.

Authors retain the right to publish their work in academic journals where copyright remains with them. Any use, distribution, or reproduction that does not comply with these terms is not permitted.

**KATEGORI SDGS:** Penelitian ini selaras dengan Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (Sustainable Development Goals/SDGs) nomor 7: Energi Bersih dan Terjangkau (Affordable and Clean Energy). Fokus utama penelitian adalah meningkatkan efisiensi operasional dan keandalan Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) XYZ melalui penerapan Life Cycle Management (LCM), analisis Pareto Loss, dan Failure Mode dalam pengambilan keputusan investasi pemeliharaan Blade Turbine Row 14. Dengan mengoptimalkan strategi pemeliharaan dan investasi berbasis data, penelitian ini mendorong efisiensi penggunaan energi, menurunkan potensi pemborosan energi akibat kerusakan teknis, serta memperpanjang umur aset pembangkit. Hal ini secara langsung berkontribusi pada peningkatan ketersediaan dan keberlanjutan pasokan listrik, yang menjadi pilar penting dalam mewujudkan akses energi yang andal, modern, dan berkelanjutan bagi masyarakat.

## II. LITERATURE REVIEW

### Life Cycle Management (LCM)

Life Cycle Management (LCM) adalah pendekatan strategis dalam pengelolaan aset yang mempertimbangkan seluruh siklus hidup peralatan, mulai dari tahap perencanaan, pengadaan, operasi, hingga dekomisioning. Menurut Rigamonti dan Mancini (2021), LCM bertujuan untuk memaksimalkan nilai aset sepanjang masa pakainya, mengurangi biaya tak terduga, serta meminimalisasi dampak lingkungan [11]. Dalam konteks pembangkit listrik, LCM digunakan untuk merencanakan investasi secara lebih tepat dan prediktif guna menghindari kerusakan mendadak yang dapat menurunkan keandalan sistem.

### Pareto Loss Analysis

Pareto Loss adalah metode analisis berbasis prinsip 80/20, yang menyatakan bahwa sebagian besar kerugian biasanya disebabkan oleh sebagian kecil penyebab. Abyad (2020) menjelaskan bahwa dalam manajemen industri, analisis Pareto digunakan untuk mengidentifikasi area kritis yang perlu segera ditangani untuk memperoleh perbaikan maksimal [7]. Dalam studi ini, Pareto Loss digunakan untuk mengidentifikasi mode kegagalan paling dominan pada Blade Turbine, sehingga perusahaan dapat memfokuskan investasi dan perawatan pada sumber gangguan terbesar.

### Failure Mode Analysis (FMA)

Failure Mode Analysis adalah pendekatan sistematis untuk mengidentifikasi, mengevaluasi, dan mengklasifikasikan potensi kegagalan pada suatu sistem. Bhangu et al. (2012) menyebutkan bahwa FMA sangat penting untuk memahami penyebab utama kerusakan serta dampaknya terhadap performa sistem secara keseluruhan [9]. Dalam konteks pembangkit listrik, FMA menjadi krusial untuk menentukan strategi pemeliharaan prediktif yang tepat serta mendukung keputusan investasi berdasarkan risiko teknis yang telah dipetakan secara akurat.

### Kelayakan Investasi Teknis dan Finansial

Penilaian kelayakan investasi mencakup evaluasi terhadap indikator finansial seperti Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), Payback Period (PP), dan Benefit-Cost Ratio (B/C). Menurut Ahmed et al. (2020), pengambilan keputusan investasi yang berbasis data keuangan dan teknis dapat meningkatkan efisiensi penggunaan modal dan menurunkan risiko proyek [20]. Dalam penelitian ini, kombinasi antara pendekatan teknis (LCM, Pareto, FMA) dan finansial digunakan untuk menghasilkan keputusan investasi yang lebih komprehensif dan akurat.

### Integrasi Pendekatan dalam Sektor Energi

Penelitian terdahulu umumnya memisahkan pendekatan teknis dan finansial dalam pengelolaan risiko investasi di sektor energi. Namun, studi oleh Ambarwati et al. (2024) menunjukkan bahwa integrasi berbagai metode analisis risiko dan kelayakan dapat memperkuat keberlanjutan operasional pembangkit [4]. Dengan menggabungkan LCM, Pareto Loss, dan FMA dalam satu framework, penelitian ini menyajikan pendekatan holistik yang belum banyak dikaji dalam studi sebelumnya.

### III. METODE PENELITIAN

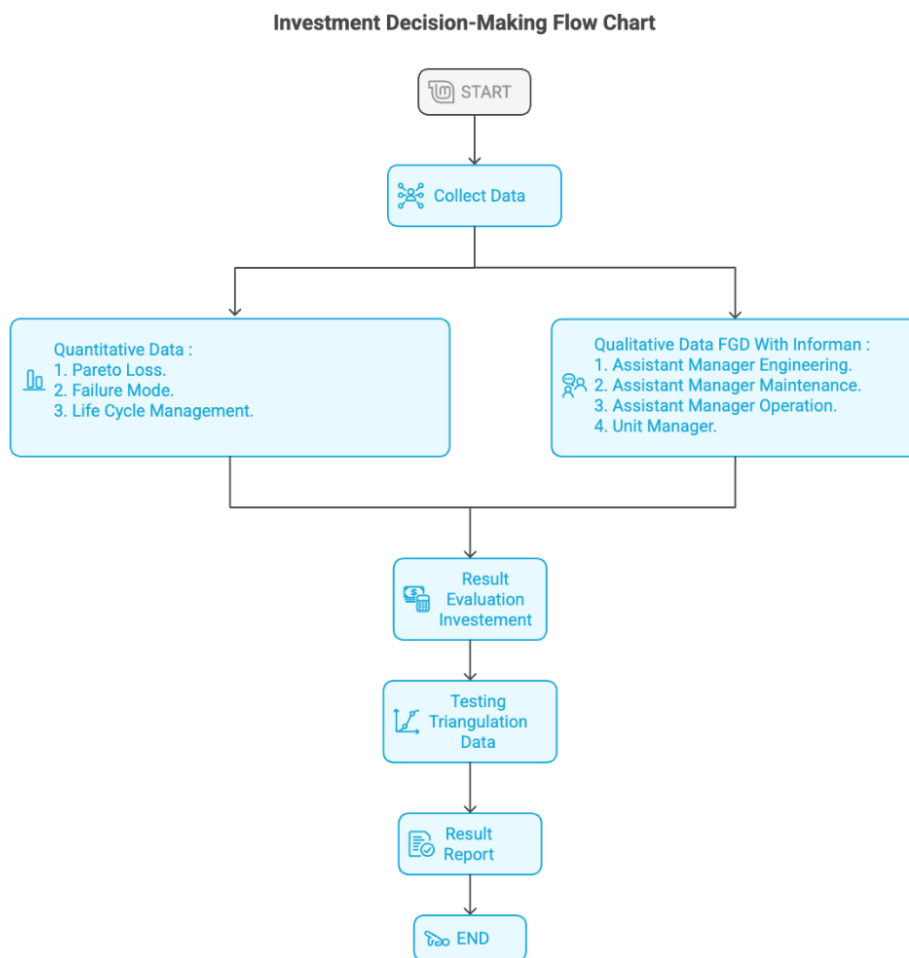
Penelitian ini menggunakan Concurrent Mixed Methods dengan menggabungkan secara bersamaan metode kuantitatif dan kualitatif yang menganalisis penerapan konsep Pareto Loss, Failure Mode dan Life Cycle Management (LCM) dalam meningkatkan efisiensi keputusan investasi di PLTU XYZ [21]. Penelitian ini bertujuan untuk mengukur dan menganalisis hubungan antara faktor-faktor investasi yang signifikan serta pengelolaan siklus hidup aset dengan efisiensi pengambilan keputusan yang dianalisis secara bersamaan. Data penelitian yang digunakan berupa data primer yang berasal dari wawancara dari informan ahli dan data sekunder dari dokumen perusahaan berupa laporan perusahaan [22]. Laporan perusahaan berupa Data Pareto Loss, Failure Mode, Data Efisiensi Operasional Pembangkit Listrik.

Teknik pengumpulan data yang digunakan oleh peneliti dalam penelitian ini adalah pengumpulan data gangguan *Pareto Loss*, data *Failure Mode* yang merupakan mode kegagalan dari suatu sistem, serta data *Life Cycle Management* sebagai usulan awal investasi [23]. *Focuss Group Discussion* dilakukan untuk membahas Failure Mode dengan Assistant manager Engineering, Assistant manager Pemeliharaan, Assistant manager Operasi, Team Leader Pemeliharaan, Team Leader Operation. Kuisisioner juga digunakan terhadap pengambilan keputusan investasi oleh Manager Unit, Assistant manager Engineering, Assistant manager pemeliharaan, Assistant manager Keuangan, Assistant manager Operasi, Assistant manager Coal Ash Handling, Pejabat pelaksana pengadaan, Keuangan dan Akuntansi.

Tahapan awal penelitian ini adalah melakukan analisis Pareto loss yang membahas tentang penyumbang kegagalan terbesar di PLTU XYZ pada periode Januari sampai Desember 2024. Failure Mode menganalisis terkait Metode kegagalan pada suatu sistem, Life Cycle Management menganalisis terkait dasar pengambilan keputusan usulan investasi berdasarkan Pareto loss, failure mode dan life cycle management [24]. Metodologi ini dirancang untuk memastikan bahwa semua aspek yang relevan dengan keberhasilan investasi di PLTU XYZ dapat diidentifikasi dan dianalisis secara menyeluruh yang dituangkan ke dalam flow chart.

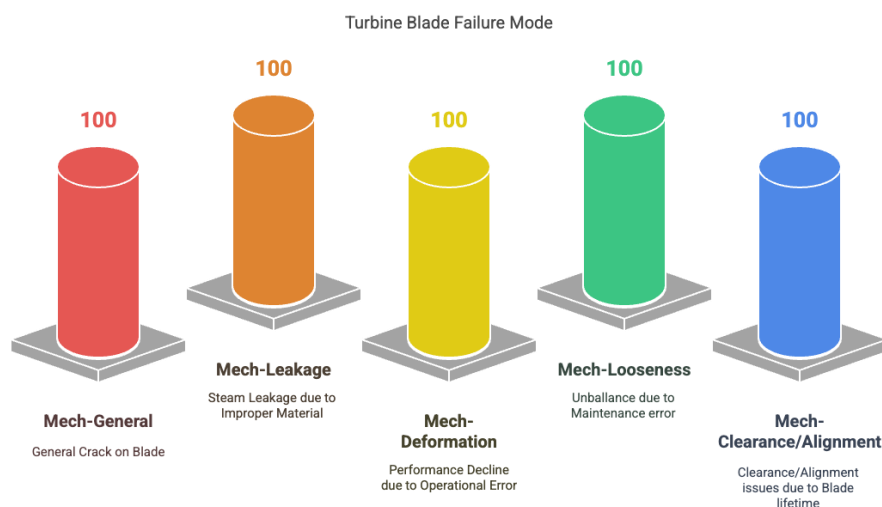
Tahapan penelitian selanjutnya yang digunakan adalah Triangulasi, untuk memverifikasi keakuratan data yang dikumpulkan. Pendekatan ini melibatkan penggabungan beberapa jenis sumber dan metode untuk mengumpulkan data, memastikan bahwa temuan valid dan dapat dilakukan olah data. Teknik Triangulasi dengan **Sumber Data**, berasal dari dua jenis sumber yaitu wawancara langsung dengan para ahli di PLTU XYZ dan dokumen resmi perusahaan. Pendekatan ini dapat memberikan perspektif langsung dari lapangan serta memahami konteks yang lebih luas dari data yang tertulis. Teknik Triangulasi dengan **Waktu**, mengamati data dari periode tertentu, yaitu Januari hingga Desember 2024, dengan controlling pagi siang sore untuk menghasilkan keakuratan data setiap hari dan di validasi setiap bulan, untuk menangkap trend dan perubahan yang terjadi selama waktu tersebut. Hal ini penting untuk menilai efektivitas kebijakan yang diterapkan dan untuk melihat bagaimana keadaan berkembang. Teknik Triangulasi dengan Metode, mengintegrasikan analisis kualitatif dan kuantitatif. Ini termasuk segalanya dari menghitung kehilangan melalui analisis Pareto, mengevaluasi kegagalan melalui diskusi kelompok fokus, hingga menggunakan manajemen siklus hidup untuk menilai keputusan investasi. Kombinasi metode ini tidak hanya mengandalkan angka-angka tetapi juga mendapatkan pemahaman yang lebih dalam tentang bagaimana keputusan diambil dan diimplementasikan dalam konteks nyata. Dengan menggabungkan semua pendekatan ini, berusaha untuk memberikan analisis yang komprehensif dan mendalam, yang tidak hanya mengungkapkan data tetapi juga konteks dan implikasinya, membantu PLTU XYZ mengambil keputusan investasi yang lebih informasi dan strategis untuk masa depan.

## Flow Chart Pengambilan Keputusan Investasi



### IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

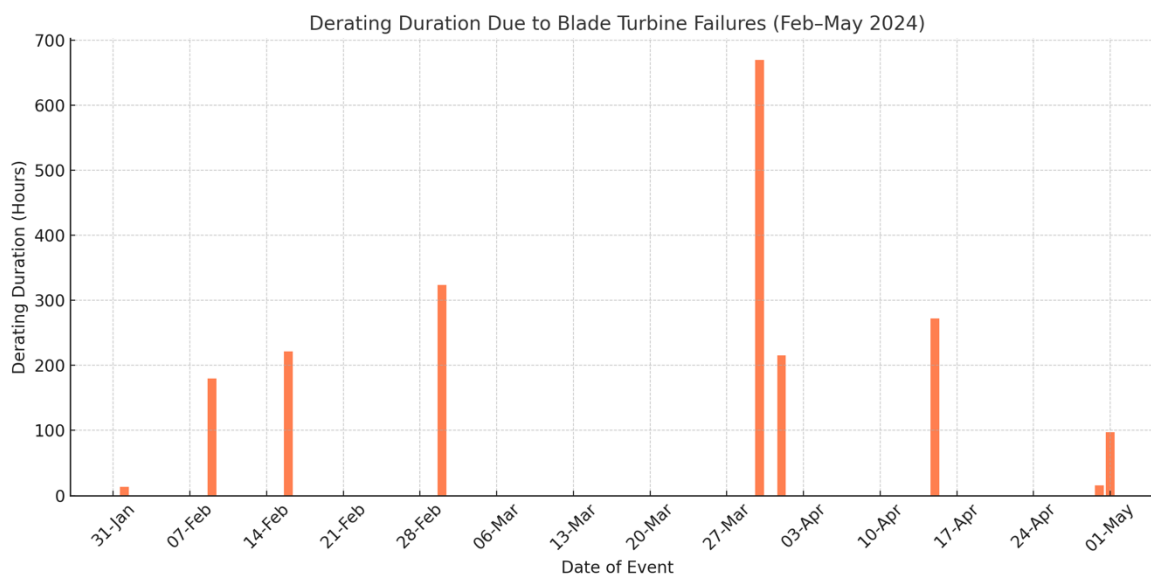
Berdasarkan Top Ten Pareto, komponen penyumbang kegagalan terbesar terhadap menurunnya performa unit pembangkit adalah blade turbine. Blade Turbine sendiri memiliki peranan penting dalam pembangkit sebagai penggerak rotor turbin secara efisien dengan mengubah mengubah energi termal menjadi energi kinetik. Dampak dari anomali blade turbine mengakibatkan Vibrasi Berlebih dan Potensi Kegagalan Mekanis yang mengakibatkan Derating Operasional sehingga berdampak pada Efisiensi Turun ( $\uparrow$ NPHR,  $\downarrow$ Efisiensi). Analisa diperkuat oleh hasil *Failure Mode Analysis* yang menunjukkan mode kegagalan pada blade turbine : *Mech-Looseness*, *Mech-Deformation*, *Mech-Leakage*, *Mech-General*, hingga *Mech-Clearance/Alignment* dengan nilai maksimum. Mode kegagalan paling signifikan berasal dari *Mech-Looseness*, yang menyebabkan ketidakseimbangan rotor dan vibrasi ekstrem, serta *Mech-Deformation* akibat suhu, tekanan operasi yang tinggi dan lifetime blade turbine.



**Gambar 1 : Diagram Failure Mode Turbine**

Pemetaan risiko dari failure mode kegagalan turbin menunjukkan lima mode kegagalan dengan skor risiko maksimum (100), mengindikasikan kondisi kritis yang memerlukan tindakan segera. Prioritas utama adalah Mech-Looseness, karena tidak seimbangan komponen dapat menyebabkan vibrasi tinggi hingga kegagalan total poros turbin. Kedua adalah Mech-Deformation, di mana deformasi bilah akibat panas (creep) atau beban berlebih mengurangi efisiensi konversi energi. Berikutnya, Mech-Leakage yang disebabkan sealing yang tidak optimal, menurunkan efisiensi termal dan mengancam keselamatan kerja. Keempat, Mech-Clearance/Alignment karena pemasangan yang tidak presisi, menciptakan gesekan dan panas lokal, mempercepat keausan. Terakhir, Mech-General mencakup kelelahan material secara umum yang memerlukan pemeliharaan rutin.

Pemotongan blade sebagai mitigasi darurat dipicu oleh kombinasi beberapa faktor kritis: kondisi operasional seperti tekanan uap tinggi yang melebihi batas, serta kontrol beban yang tidak stabil; praktik pemeliharaan kurang konsisten, sehingga deteksi kerusakan dini gagal dilakukan; kualitas material yang rendah akibat cacat produksi dan kelelahan siklus termal; serta faktor lingkungan seperti kelembaban tinggi dan suhu ekstrem yang mempercepat korosi dan degradasi material. Meski efektif sebagai tindakan sementara untuk mencegah kerusakan lanjutan, langkah ini harus segera dilanjutkan dengan audit teknik komprehensif, peningkatan program predictive maintenance, inspeksi rutin, serta pelatihan teknisi guna memastikan solusi berkelanjutan terhadap permasalahan turbin tersebut.



**Gambar 2 : Diagram batang Operasi Unit 2**

Gambar 2, menunjukkan *Durasi Derating Akibat Kerusakan Blade Turbin* pada rentang Februari hingga Mei 2024. Dari pola dapat dilihat jelas adanya lonjakan ekstrem pada tanggal **02 Maret 2024**, dengan total durasi derating mendekati **700 jam**, yang merupakan puncak kejadian derating selama periode observasi. Selain itu, terjadi beberapa lonjakan signifikan lain, yaitu pada **16 Februari**, **01 April**, dan **15 April**, masing-masing mencatat derating di atas **200 jam**, yang mengindikasikan bahwa frekuensi dan durasi gangguan akibat kerusakan blade cukup sering dan berulang.

Derating yang terjadi selama 151 jam akibat kerusakan blade secara langsung diklasifikasikan sebagai *equivalent forced derated hours*, yang merupakan komponen utama dalam perhitungan EFOR. EFOR sebesar **1,76%** yang tercatat untuk tahun 2024 merefleksikan bahwa sekitar 1,76% dari total waktu operasional mengalami gangguan parsial akibat kondisi teknis. Hal ini konsisten dengan grafik di atas, di mana kerusakan blade menyebabkan unit tidak beroperasi pada kapasitas penuh dalam durasi yang cukup signifikan. Grafik derating ini berfungsi sebagai representasi visual dari EFOR semakin tinggi dan seringnya derating, semakin besar nilai EFOR, yang mengindikasikan rendahnya keandalan unit secara operasional.

EAF sebesar **1,72 (dalam skala rasio atau 98,28% dalam persen)** menunjukkan bahwa unit masih tergolong cukup tersedia untuk beroperasi, namun dengan penurunan ketersediaan akibat derating. Meskipun EAF masih menunjukkan angka tinggi, grafik ini menunjukkan bahwa ada potensi penurunan EAF lebih lanjut jika derating tidak ditangani secara sistemik, karena derating yang berkepanjangan secara akumulatif akan menggerus *availability* aktual unit.

**Tabel 1: Tabel Rumus EFOR dan EAF**

**Rumus :**

**1.75 %**

**98.25 %**

EFOR dihitung dari total *Equivalent Forced Derated Hours* (EFDH) terhadap total jam operasi. berdasarkan data. Dik :

- FOH = 0 jam
- EFDH = 151 jam
- SH = 8.609 jam

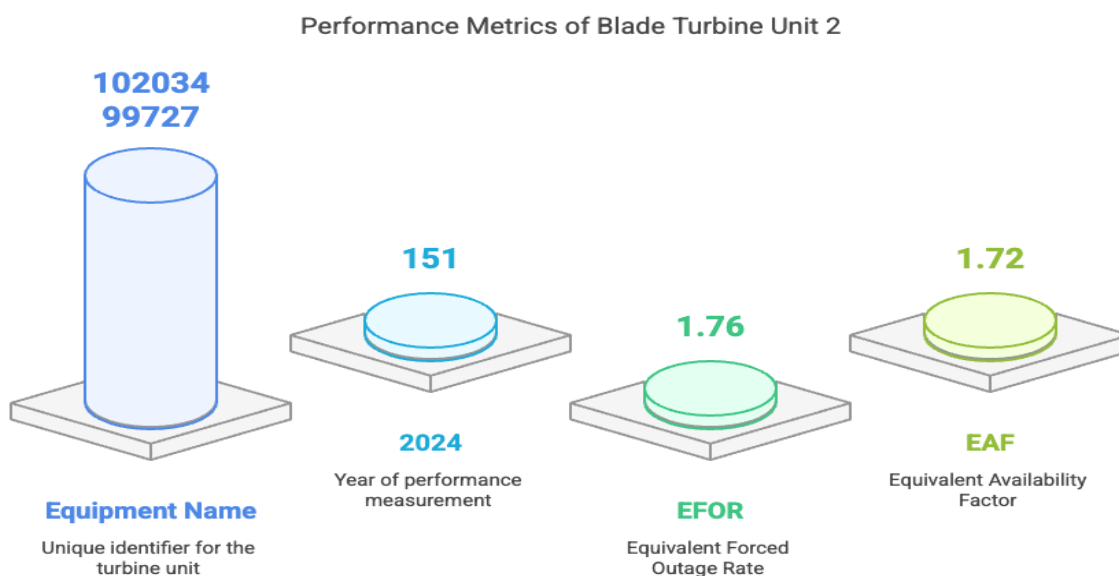
Copyright © Universitas Muhammadiyah Sidoarjo. This preprint is protected by copyright held by Universitas Muhammadiyah Sidoarjo and is distributed under the Creative Commons Attribution License (CC BY). Users may share, distribute, or reproduce the work as long as the original author(s) and copyright holder are credited, and the preprint server is cited per academic standards.

Authors retain the right to publish their work in academic journals where copyright remains with them. Any use, distribution, or reproduction that does not comply with these terms is not permitted.

- EFDHRS = 0 jam
- POH = 8.609 jam
- FOH = 0 jam
- EFDH = 151 jam
- EFDHRS = 0 jam

Berdasarkan hasil perhitungan Equivalent Forced Outage Rate (EFOR), didapatkan nilai sebesar **1,75%** dari total waktu operasional unit PLTU XYZ selama periode pengamatan. Perhitungan ini menggunakan data sebagai berikut: *Forced Outage Hours (FOH)* = 0 jam, *Equivalent Forced Derated Hours (EFDH)* = 151 jam, *Service Hours (SH)* = 8.609 jam, dan *EFDHRS* = 0 jam. Nilai EFOR sebesar 1,75% menunjukkan tingkat gangguan dalam bentuk derating yang masih tergolong rendah. Ini mengidentifikasi keandalan unit PLTU masih terjaga dengan baik, dengan waktu gangguan relatif kecil dibandingkan total jam operasi. Namun demikian, meskipun gangguan dalam bentuk *forced outage* tidak terjadi sama sekali, kehadiran derating sebesar 151 jam tetap menjadi sinyal penting akan adanya anomali teknis dalam hal ini diidentifikasi berasal dari kerusakan pada blade turbin. Derating tersebut bisa berdampak signifikan terhadap output daya aktual dan efisiensi ekonomi pembangkit. Dalam konteks operasi jangka panjang, nilai EFOR ini masih berada dalam batas toleransi yang dapat diterima dalam industri pembangkitan listrik, namun tidak boleh diabaikan karena akumulasi gangguan minor dapat memicu kerusakan mayor jika tidak segera ditindaklanjuti. Oleh karena itu, tindakan perbaikan berbasis root cause analysis sangat penting agar nilai EFOR tetap rendah dan tidak meningkat di periode berikutnya.

Nilai **EAF sebesar 98.25%** menunjukkan bahwa ketersediaan operasional unit PLTU XYZ selama periode observasi sangat tinggi, yang menandakan bahwa operasional pembangkit berjalan dengan cukup baik meski terdapat beberapa gangguan minor (derating). Nilai EAF sebesar ini merupakan indikasi bahwa tingkat ketersediaan operasional unit sangat tinggi. Artinya, unit mampu menyediakan tenaga listrik mendekati kapasitas penuh hampir sepanjang waktu operasional, dengan gangguan yang relatif kecil. Namun, dari grafik terlihat adanya fluktuasi derating yang signifikan, khususnya pada awal Maret 2024 yang mencapai hampir 700 jam derating. Hal ini menandakan adanya gangguan berat pada sistem, yang disebabkan oleh kerusakan signifikan pada Blade Turbin, sebagaimana dianalisis dalam failure mode sebelumnya. Kerusakan blade menyebabkan penurunan performa (derating), bukan outage penuh. EAF tetap tinggi karena unit masih menghasilkan output, efisiensi produksi dan keandalan pasokan energi tetap terpengaruh secara nyata. Peristiwa derating seperti ini berpotensi berdampak pada turunnya Heat Rate, meningkatnya biaya bahan bakar per kWh, dan meningkatnya beban operasional akibat kondisi sub-optimal. Meskipun indikator EAF tampak positif secara numerik, analisa teknis menunjukkan bahwa mitigasi terhadap root cause failure, khususnya pada blade turbin, harus menjadi prioritas strategis. Hal ini penting untuk menjaga kinerja PLTU tidak hanya dalam ketersediaan, namun juga efisiensi dan keandalan jangka panjangnya.



**Gambar 3: Diagram Efisiensi Blade Turbine Unit 2**

Kinerja Blade Turbine Unit 2 tahun 24 menunjukkan nilai Equivalent Availability Factor (EAF) sebesar 1,72 (dalam skala rasio khusus) dan Equivalent Forced Outage Rate (EFOR) sebesar 1,76%. Durasi gangguan parsial (derating) tercatat 151 jam selama periode operasi, menandakan berkurangnya kemampuan unit dalam mencapai daya optimal. Nilai EAF yang rendah mengindikasikan turbin sering mengalami gangguan parsial, menyebabkan berkurangnya kapasitas produksi energi. Sementara itu, nilai EFOR 1,76% menegaskan bahwa sejumlah waktu operasional telah terganggu, khususnya akibat masalah pada bilah turbin. Kondisi ini secara langsung berdampak negatif pada efisiensi produksi energi, peningkatan biaya operasional, penurunan profitabilitas, serta potensi ketidakstabilan pasokan listrik. Dengan demikian, hasil ini menunjukkan urgensi tinggi

lagi PLTU untuk meningkatkan keandalan operasional melalui strategi pemeliharaan prediktif dan investasi penggantian komponen utama, terutama blade turbin.



**Gambar 4: Proyeksi Investasi Blade Turbine**

Analisis investasi gambar 4, investasi sebesar Rp5.955.150.000 menunjukkan kelayakan finansial yang tinggi dengan potensi penghematan tahunan sebesar Rp9.791.568.000. Indikator finansial utama memperlihatkan kinerja investasi sangat baik : Net Present Value (NPV) sebesar Rp54.966.699.091,46, Internal Rate of Return (IRR) mencapai 164%, Payback Period (PP) yang sangat singkat yaitu 1 tahun, serta rasio Benefit-Cost (B/C) yang sangat tinggi, yaitu 16,44 kali. Kondisi ini menegaskan bahwa investasi tersebut tidak hanya layak secara finansial, namun juga sangat menguntungkan dan memiliki risiko rendah terhadap ketidakpastian ekonomi dalam periode analisis 10 tahun ke depan. Dengan demikian, rekomendasi kuat untuk merealisasikan investasi ini menjadi pilihan strategis bagi perusahaan. Penelitian menunjukkan bahwa grafik proyeksi NPV investasi selama 10 tahun, terlihat tren pertumbuhan nilai investasi Blade Turbine yang konsisten. Nilai NPV positif sejak tahun pertama sebesar Rp296 juta, menunjukkan investasi mulai menghasilkan manfaat ekonomis secara cepat. Pertumbuhan signifikan terjadi pada tahun ke-3 dengan NPV mencapai Rp888 juta, mencerminkan pemulihan modal yang efektif. Kenaikan ini berlanjut hingga tahun ke-5 dengan nilai NPV Rp1,283 miliar, menegaskan bahwa biaya investasi telah tertutup sepenuhnya melalui efisiensi operasional dan pengurangan derating turbin sehingga dapat disimpulkan bahwa investasi tidak hanya menguntungkan secara finansial tetapi juga secara strategis memperkuat keandalan sistem pembangkit listrik jangka panjang. Dengan demikian, hasil proyeksi ini menegaskan keputusan investasi Blade Turbine sangat layak dan strategis dalam meningkatkan efisiensi teknis sekaligus profitabilitas PLTU XYZ.

**Tabel 2 : Tabel NPV, IRR,PP dan B/C**

Parameter	Nilai	Interpretasi
Net Present Value	Rp54.966.699.091	NPV sangat positif menunjukkan proyek menghasilkan nilai tambah besar
Internal Rate of Return	164%	IRR jauh lebih tinggi dari discount rate, investasi sangat layak

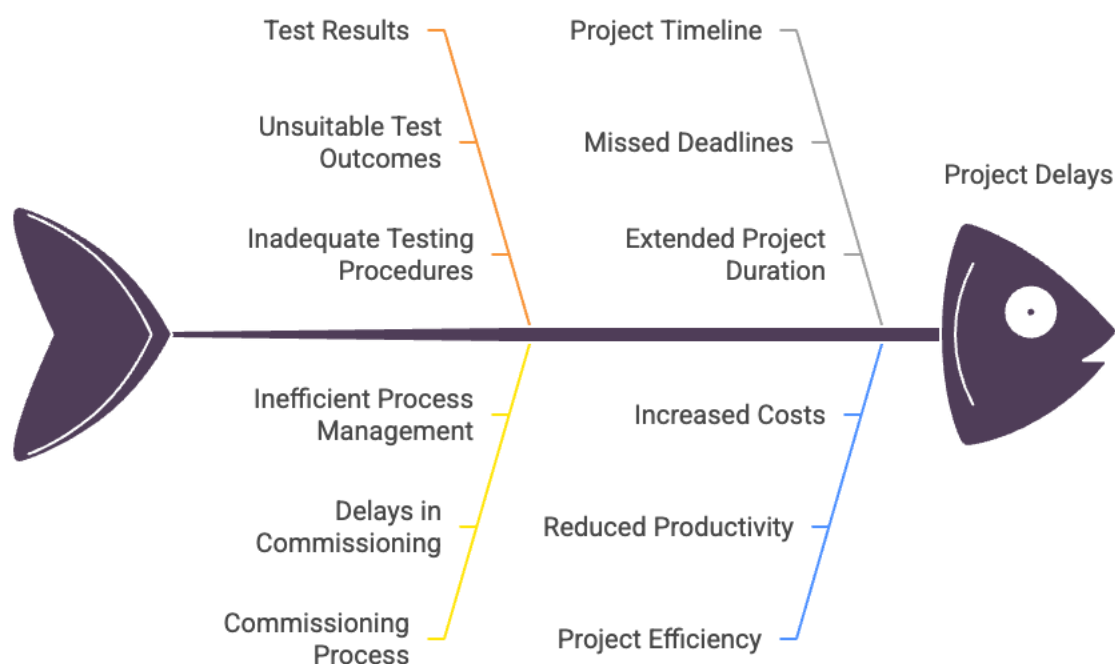
Copyright © Universitas Muhammadiyah Sidoarjo. This preprint is protected by copyright held by Universitas Muhammadiyah Sidoarjo and is distributed under the Creative Commons Attribution License (CC BY). Users may share, distribute, or reproduce the work as long as the original author(s) and copyright holder are credited, and the preprint server is cited per academic standards.

Authors retain the right to publish their work in academic journals where copyright remains with them. Any use, distribution, or reproduction that does not comply with these terms is not permitted.

Payback Period	1 tahun	PP hanya 1 tahun, menunjukkan pengembalian modal sangat cepat
Benefit-Cost Ratio	16,44 kali	Setiap Rp1 investasi menghasilkan Rp16,44 manfaat, sangat efisien

**Tabel 2**, hasil analisis finansial proyek investasi penggantian Blade Turbine PLTU XYZ dinyatakan sangat layak. Nilai **Net Present Value (NPV)** sebesar **Rp54,97 miliar** menunjukkan keuntungan bersih yang signifikan dalam 10 tahun. **Internal Rate of Return (IRR)** mencapai **164%**, jauh melampaui tingkat diskonto 9,71%, menandakan tingkat pengembalian investasi yang sangat tinggi. **Payback Period (PP)** hanya **1 tahun**, yang mencerminkan pengembalian modal sangat cepat dan minim risiko likuiditas. Sementara itu, **Benefit-Cost Ratio (B/C)** sebesar **16,44** menunjukkan bahwa setiap **Rp1 investasi menghasilkan Rp16,44 manfaat**, menandakan efisiensi finansial yang luar biasa. Temuan ini memperkuat bahwa proyek sangat menguntungkan secara teknis dan ekonomis.

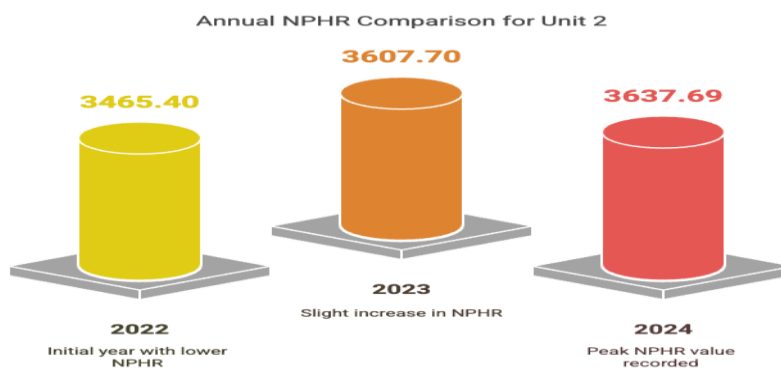
### Analyzing Project Delays Due to Test Results



**Gambar 5: Fishbone Matriks Resiko Investasi**

Diagram fishbone gambar 5, menggambarkan sumber utama risiko dalam investasi blade turbin PLTU XYZ. Risiko tertinggi berasal dari empat area: **perencanaan**, **pelaksanaan**, **pengadaan**, dan **pengujian/komisioning**. Pada tahap perencanaan, kesalahan desain dan kurangnya review menyebabkan spesifikasi blade tidak sesuai kondisi lapangan. Pelaksanaan menghadapi risiko keterlambatan proyek dan kendala logistik yang berdampak pada jadwal shutdown. Di sisi pengadaan, klausul kontrak yang lemah dan keterbatasan vendor meningkatkan risiko kualitas. Sementara itu, fase pengujian dan komisioning rawan gagal uji performa

dan keterlambatan operasional ulang. Keseluruhan analisis ini menunjukkan bahwa investasi blade sangat rentan jika tidak disertai mitigasi lintas fungsi, dan perlu didukung pendekatan **LCM, Pareto Loss, dan Failure Mode Analysis** secara simultan untuk menjaga keandalan dan efisiensi pembangkit.



**Gambar 6: Grafik NPHR Blade Turbine Unit 2**

Hasil penelitian menunjukkan bahwa grafik NPHR (Net Plant Heat Rate) Unit 2 periode 2022-2024, terlihat jelas peningkatan nilai NPHR dari 3465,40 kCal/kWh pada tahun 2022 menjadi 3637,69 kCal/kWh di tahun 2024. Kenaikan sebesar 172,29 kCal/kWh ini menandakan efisiensi termal pembangkit mengalami penurunan signifikan, sehingga lebih banyak energi panas diperlukan untuk memproduksi tiap kilowatt-hour listrik. Tren negatif ini mengindikasikan adanya potensi masalah operasional, seperti degradasi blade turbin, kualitas pembakaran yang buruk, atau faktor eksternal seperti kualitas bahan bakar menurun. Secara risiko, peningkatan NPHR ini akan menyebabkan kenaikan biaya bahan bakar dan dampak lingkungan akibat emisi karbon yang lebih tinggi, menurunkan profitabilitas perusahaan (ROA dan ROE), serta meningkatkan risiko operasional. Untuk itu, mitigasi segera seperti perawatan preventif rutin, optimalisasi sistem pembakaran, penggantian atau retrofit komponen utama, serta pengawasan ketat pada sensor dan kontrol harus diprioritaskan. Data NPHR ini juga sangat relevan dalam kerangka Enterprise Risk Management (ERM) sebagai dasar evaluasi risiko, penjadwalan overhaul, serta strategi investasi jangka panjang untuk menjaga performa operasional yang optimal.

**Tabel 3: Perbedaan Tesis Terdahulu Dan Pembaharuan**

Aspek	Tesis Terdahulu	Tesis Ini
<b>Pendekatan</b>	Umumnya menggunakan FMEA, BIA, atau analisis teknis saja	Menggabungkan LCM, Pareto Loss, dan Failure Mode
<b>Objek</b>	Turbin atau sistem secara umum	Spesifik pada Blade Row 14 di PLTU XYZ
<b>Metode Validasi</b>	Sekunder atau survei	Triangulasi: data primer, waktu, metode
<b>Output Keputusan</b>	Rekomendasi teknis atau operasional	Keputusan investasi berbasis kelayakan finansial dan teknis
<b>Kontribusi Praktis</b>	Umumnya untuk pengembangan pengetahuan	Memberikan solusi investasi aplikatif untuk perpanjangan umur aset

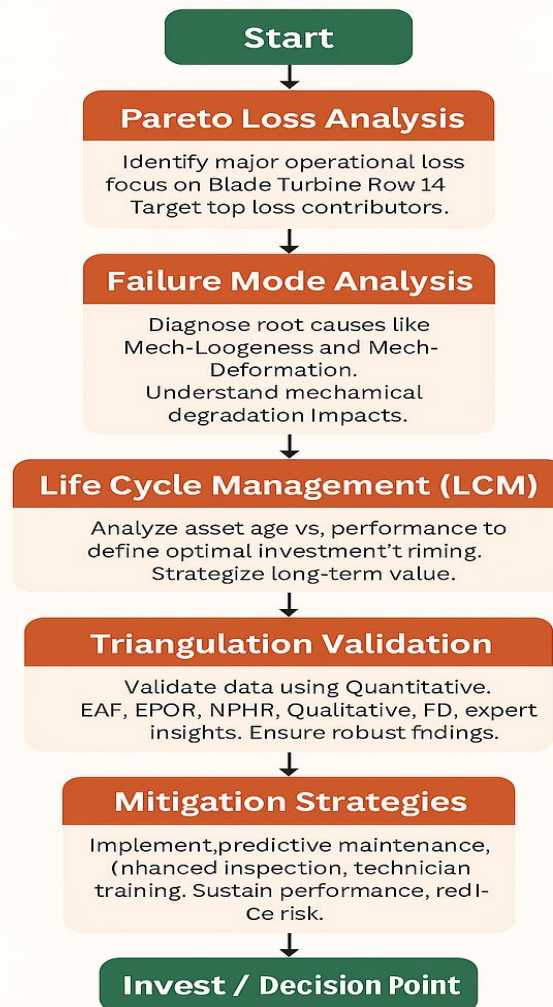
**Pendekatan Triangulasi Data**, tesis ini menggunakan pendekatan triangulasi (sumber data, metode, waktu) yang belum banyak diterapkan dalam penelitian-penelitian sebelumnya di sektor pembangkit. Validasi data dilakukan dari wawancara ahli, observasi teknis, dan dokumen historis kinerja peralatan. **Fokus Spesifik pada Blade Row 14**, merupakan studi kasus pertama yang secara eksplisit menyoroti *Row 14* blade turbin sebagai objek keputusan investasi berbasis LCM, menjadikannya unik dibanding tesis lain yang biasanya membahas turbin secara umum. **Integrasi LCM dengan Pareto Loss dan Failure Mode**, Tesis ini menggabungkan **Life Cycle Management, Pareto Loss Analysis, dan Failure Mode** secara dalam menganalisa serta mengevaluasi

Copyright © Universitas Muhammadiyah Sidoarjo. This preprint is protected by copyright held by Universitas Muhammadiyah Sidoarjo and is distributed under the Creative Commons Attribution License (CC BY). Users may share, distribute, or reproduce the work as long as the original author(s) and copyright holder are credited, and the preprint server is cited per academic standards.

Authors retain the right to publish their work in academic journals where copyright remains with them. Any use, distribution, or reproduction that does not comply with these terms is not permitted.

strategi investasi dan menjadikannya framework yang belum digunakan di karya ilmiah sebelumnya. Hasil berbasis **Mix Methods (Kuantitatif-Kualitatif)**, kombinasi antara : NPV, IRR, EAF, dan EFOR dengan FGD teknis serta observasi langsung memperkuat validitas analisis, tidak hanya menampilkan angka tetapi juga insight kontekstual pengambilan keputusan.

## Investment Execution Flowchart (Enhanced 8-Step Version)



Framework penelitian ini dibangun atas dasar keterkaitan antara kinerja operasional pembangkit, risiko teknis komponen kritis, dan strategi pengambilan keputusan investasi berbasis data. Titik awal dari kerangka pemikiran ini adalah identifikasi kerugian terbesar melalui **analisis Pareto Loss**, yang menyoroti bahwa gangguan derating terbesar berasal dari kerusakan Blade Turbine Row 14. Selanjutnya, melalui **Failure Mode Analysis**, ditemukan bahwa *Mech-Looseness* dan *Deformation* merupakan penyebab dominan penurunan performa, yang mengarah pada peningkatan **Equivalent Forced Outage Rate (EFOR)** dan penurunan **Equivalent Availability Factor (EAF)** serta efisiensi termal (*Net Plant Heat Rate*). Langkah berikutnya dalam kerangka ini adalah penerapan **Life Cycle Management (LCM)** sebagai pendekatan strategis untuk memetakan umur teknis aset dan menentukan waktu optimal investasi. LCM digunakan untuk mengintegrasikan temuan teknis dengan analisis kelayakan finansial melalui parameter **Net Present Value (NPV)**, **Internal Rate of Return (IRR)**, **Payback Period (PP)**, dan **Benefit/Cost Ratio (B/C)**. Pendekatan ini memungkinkan penilaian menyeluruh, baik dari sisi teknis maupun ekonomis. Untuk memperkuat validitas keputusan, framework ini didukung oleh metode

**triangulasi** menggabungkan data kuantitatif (EAF, EFOR, NPHR, NPV, IRR) dan kualitatif (wawancara ahli, observasi lapangan, FGD) serta mempertimbangkan dimensi waktu dan sumber. Output dari kerangka ini bukan hanya menghasilkan kesimpulan investasi yang layak secara angka, tetapi juga strategi mitigasi risiko jangka panjang seperti predictive maintenance, peningkatan kualitas inspeksi, dan penguatan kapasitas teknis. Dengan demikian, framework ini menjelaskan alur sistematis dari identifikasi risiko dominan, diagnosis akar masalah teknis, pemetaan siklus hidup aset, hingga evaluasi kelayakan investasi yang berdampak pada efisiensi, keandalan, dan keberlanjutan operasional PLTU XYZ.

## V. KESIMPULAN DAN REKOMENDASI

Penelitian ini menyimpulkan bahwa penerapan Life Cycle Management (LCM) yang dikombinasikan dengan pendekatan Pareto Loss dan Failure Mode Analysis terbukti efektif dalam meningkatkan akurasi keputusan investasi pada Blade Turbine Row 14 di PLTU XYZ. Temuan utama menunjukkan bahwa gangguan bertipe *Mech-Looseness* dan *Deformation* merupakan penyebab dominan derating, dengan total waktu gangguan mencapai lebih dari 700 jam dan berdampak pada penurunan efisiensi termal serta peningkatan NPHR hingga 3637,69 kCal/kWh pada tahun 2024. Secara finansial, investasi senilai Rp5,95 miliar dinyatakan sangat layak, didukung oleh perhitungan NPV sebesar Rp54,97 miliar, IRR mencapai 164%, *Payback Period* hanya 1 tahun, dan rasio *Benefit/Cost* sebesar 16,44 kali. Penelitian ini memberikan kontribusi strategis terhadap pengambilan keputusan investasi dengan menyajikan model integratif berbasis data aktual dan konteks operasional. Namun demikian, studi ini memiliki keterbatasan pada cakupan lokasi tunggal dan rentang waktu observasi satu tahun, serta belum mempertimbangkan pengaruh faktor eksternal seperti dinamika pasar atau kebijakan energi nasional. Oleh karena itu, disarankan agar penelitian lanjutan mencakup lebih banyak unit pembangkit, memperpanjang periode evaluasi, serta mengintegrasikan teknologi digital seperti *real-time monitoring* dan *predictive analytics* untuk menghasilkan keputusan investasi yang lebih presisi dan adaptif terhadap perubahan.

Hasil penelitian menunjukkan berdasarkan temuan, disarankan agar PLTU XYZ segera mengimplementasikan sistem pemeliharaan prediktif berbasis data LCM untuk mendeteksi pola kegagalan secara dini, khususnya pada komponen turbin yang berisiko tinggi seperti blade Row 14 dan 15. Strategi ini perlu didukung oleh sistem pengumpulan data derating yang lebih presisi, penerapan inspeksi berbasis risk-based maintenance (RBM), serta integrasi antara tim engineering, operasi, dan keuangan dalam proses evaluasi investasi pemeliharaan. Selain itu, perlu dilakukan analisis Pareto secara berkala terhadap derating hours untuk memprioritaskan penanganan pada sumber kerugian terbesar. PLTU juga disarankan untuk melakukan upgrading sistem monitoring efisiensi, seperti real-time NPHR tracking, untuk menekan pemborosan energi. Secara kelembagaan, PLTU perlu mengadopsi pendekatan pengambilan keputusan berbasis data dan memperkuat justifikasi teknis dalam usulan anggaran, sehingga proses investasi tidak hanya reaktif tetapi juga proaktif terhadap potensi risiko masa depan. Dengan implementasi strategi ini, diharapkan PLTU XYZ mampu mempertahankan efisiensi, meningkatkan ketersediaan unit, serta mencapai keberlanjutan finansial dan operasional jangka panjang.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Dengan segala kerendahan hati, penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Allah SWT atas limpahan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian ini dengan baik. Ucapan terima kasih juga penulis sampaikan kepada seluruh pihak yang telah memberikan bimbingan, arahan, dan motivasi yang tiada henti selama proses penelitian ini. Terima kasih yang mendalam juga penulis sampaikan kepada keluarga tercinta yang selalu memberikan doa, semangat, dan dukungan moril maupun materiil dalam setiap langkah perjuangan ini.

### Daftar Pustaka

- [1] A. Ocolişanu, G. Dobrotă, and D. Dobrotă, “The Effects of Public Investment on Sustainable Economic Growth: Empirical Evidence from Emerging Countries in Central and Eastern Europe,” *Sustainability*, vol. 14, no. 14, p. 8721, Jul. 2022, doi: 10.3390/su14148721.
- [2] R. Ambarwati, Dedy, R. Dijaya, and I. Anshory, “A multi-method study of risk assessment and human risk control for power plant business continuity in Indonesia,” *Results Eng.*, vol. 21, p. 101863, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.rineng.2024.101863.
- [3] G. Murehwa, D. Zimwara, W. Tumbudzuku, and S. Mhlanga, “Energy Efficiency Improvement in Thermal Power Plants,” *Int. J. Innov. Technol. Explor. Eng.*, vol. 2, no. 1, 2012.
- [4] R. Ambarwati, D. Yuliasri, and W. Sulistiyowati, “Human resource risk control through COVID-19 risk assessment in Indonesian manufacturing,” *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 74, p. 104665, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.jlp.2021.104665.
- [5] R. Andespa, D. A. I. Maruddani, and T. Tarno, “Expected Shortfall Dengan Ekspansi Cornish-Fisher Untuk Analisis Risiko Investasi Sebelum Dan Sesudah Pandemi Covid-19 Dilengkapi Gui R,” *J. Gaussian*, vol. 11, no. 2, pp. 173–182, Aug. 2022, doi: 10.14710/j.gauss.v11i2.35457.
- [6] E. Wong, “Data Analysis Support of Artificial Intelligence in Financial Investment Decision-Making,” *Mod. Econ. Manag. Forum*, vol. 5, no. 5, p. 784, Oct. 2024, doi: 10.32629/memf.v5i5.2840.
- [7] A. Abyad, “The Pareto Principle: Applying the 80/20 Rule to Your Business,” *Middle East J. Bus.*, vol. 15, no. 1, pp. 6–9, 2020, doi: 10.5742/MEJB.2021.93880.
- [8] D. E. Pujiwisanti Putri, *Penjadwalan Perawatan Level Luffing Crane 40 Ton Menggunakan Metode Reliability Centered Maintenance (RCM II)*. Surabaya: Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya (PPNS), 2023.
- [9] N. S. Bhangu, R. Singh, and G. L. Pahuja, “Failure Mode and Effect Analysis of a Thermal Power Plant for Enhancing its Reliability,” *Appl. Mech. Mater.*, vol. 110–116, pp. 2969–2975, Oct. 2011, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.110-116.2969.
- [10] P. P. Widya, R. Ambarwati, D. Dedy, and M. T. Alimova, “Leveraging Social Network Analysis for Enhancing Safety Reporting in the Workplace,” *J. Tek. Ind.*, vol. 26, no. 1, pp. 9–24, Mar. 2024, doi: 10.9744/jti.26.1.9-24.
- [11] L. Rigamonti and E. Mancini, “Life cycle assessment and circularity indicators,” *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 26, no. 10, pp. 1937–1942, Oct. 2021, doi: 10.1007/s11367-021-01966-2.
- [12] K. Fettah *et al.*, “A pareto strategy based on multi-objective optimal integration of distributed generation and compensation devices regarding weather and load fluctuations,” *Sci. Rep.*, vol. 14, no. 1, p. 10423, May 2024, doi: 10.1038/s41598-024-61192-2.
- [13] D. Rooscote, D. Hendragiri, and A. Suharwanto, “Implementation Risk Indicator and Application of Reliability Management to Ensure the Success of LCM and Risk Management Integration,” in *Volume 13: Research Posters; Safety Engineering, Risk and Reliability Analysis*, American Society of Mechanical Engineers, Oct. 2023. doi: 10.1115/IMECE2023-110981.
- [14] V. Haievskiy, “Study Of Possibilities Of Joint Application Of Pareto Analysis And Risk Analysis During Corrective Actions,” *Technol. Transf. Fundam. Princ. Innov. Tech. Solut.*, vol. 4, pp. 22–24, Nov. 2020, doi: 10.21303/2585-6847.2020.001536.
- [15] H. Anysz, A. Nicał, Ž. Stević, M. Grzegorzewski, and K. Sikora, “Pareto Optimal Decisions in Multi-Criteria Decision Making Explained with Construction Cost Cases,” *Symmetry (Basel)*, vol. 13, no. 1, p. 46, Dec. 2020, doi: 10.3390/sym13010046.
- [16] Dedy, A. Sudiarno, and R. Ambarwati, “Shaping the Climate and Culture of Safety Through Safety Leadership in Power Plant,” *Int. Conf. Inf. Technol. Eng. Sci. its Appl.*, 2018.
- [17] G. S. Mahendra, *Green Technology: Panduan Teknologi Ramah Lingkungan*. PT. Sonpedia Publishing Indonesia, 2024.
- [18] D. Lo Presti, A. Jimenez Del Barco Carrión, G. Buttitta, A. A. Butt, and J. Harvey, “A Methodology for

- the Life Cycle Management of European Road Pavements,” 2024, pp. 282–290. doi: 10.1007/978-3-031-61585-6\_27.
- [19] M. Sapruwan, W. S. Irawanty, L. Khoiriyah, A. Bete, and F. Novia, “Analisis Strategi Manajemen Keuangan Dalam Meningkatkan Kinerja Finansial Perusahaan Studi Kasus Pada Pt. Unilever Indonesia,” *Neraca J. Ekon. Manaj. dan Akunt.*, vol. 2, no. 2, 2024, doi: <https://doi.org/10.572349/neraca.v2i2.859>.
- [20] B. Ahmed *et al.*, “Does Firm Life Cycle Impact Corporate Investment Efficiency?,” *Sustainability*, vol. 13, no. 1, p. 197, Dec. 2020, doi: 10.3390/su13010197.
- [21] K. Yoshida, T. Hiruta, Y. Kishita, and Y. Umeda, “Model-based Life Cycle Management Using Deterioration Simulation,” *Procedia CIRP*, vol. 80, pp. 500–505, 2019, doi: 10.1016/j.procir.2019.01.098.
- [22] S. Fawzy, A. I. Osman, J. Doran, and D. W. Rooney, “Strategies for mitigation of climate change: a review,” *Environ. Chem. Lett.*, vol. 18, no. 6, pp. 2069–2094, Nov. 2020, doi: 10.1007/s10311-020-01059-w.
- [23] Z. Wu, W. Liu, and W. Nie, “Literature review and prospect of the development and application of FMEA in manufacturing industry,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 112, no. 5–6, pp. 1409–1436, Jan. 2021, doi: 10.1007/s00170-020-06425-0.
- [24] S. Vyas, A. Desai, S. Badave, A. Kulkarni, and B. Rajiv, “Critical Analysis of Heat Exchanger Cycle for its Maintainability Using Failure Modes and Effect Analysis and Pareto Analysis,” *World Acad. Sci. Eng. Technol. Int. J. Ind. Manuf. Eng.*, vol. 11, no. 5, 2017.

**Conflict of Interest Statement:**

*The author declares that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest.*