



## Implementasi Metode LCCA dalam Strategi Perbaikan Blade Cooling Tower di PLTP

Deden Ibnu Sahid<sup>1</sup>, Minto Yuwono<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Universitas Garut

Email : [sahidibnu81@gmail.com](mailto:sahidibnu81@gmail.com)

### Article Info

#### Article history:

Received Juni 17, 2025

Revised Juni 23, 2025

Accepted Juni 29, 2025

#### Keywords:

Life Cycle Cost Analysis, Fan Blade, Cooling Tower, Repair, Energy Efficiency.

### ABSTRACT

*This study aims to evaluate the effectiveness of applying the Life Cycle Cost Analysis (LCCA) method in determining the repair strategy for cooling tower fan blades at a Geothermal Power Plant (PLTP). The cooling tower is a vital component in maintaining the thermal efficiency of the power generation system, with fan blades playing a crucial role in the cooling process. Issues such as corrosion, mechanical wear, and fouling often reduce performance and increase operational costs. This study compares two repair alternatives: purchasing new fan blades and repairing existing ones using the ceramic coating method, by assessing the total costs and benefits throughout each option's service life. The LCCA method is used to analyze initial, operational, maintenance, and replacement costs, and to calculate the present value of each scenario under different analysis periods. A case study at a PLTP in West Java shows that the ceramic coating method provides higher cost efficiency, saving approximately IDR 65 million compared to purchasing new blades. Additionally, the repair improved cooling efficiency by up to 5°C and increased power output by 4%. A sensitivity analysis was also conducted to assess risks related to price fluctuations and component life expectancy. In conclusion, LCCA is proven effective in helping PLTPs select the most economical, efficient, and sustainable repair strategy, while providing a data-driven foundation for asset management decision-making in the renewable energy industry.*

This is an open access article under the [CC BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.



### Article Info

#### Article history:

Received Juni 17, 2025

Revised Juni 23, 2025

Accepted Juni 29, 2025

#### Keywords:

Life Cycle Cost Analysis, Fan Blade, Cooling Tower, Perbaikan, Efisiensi Energi.

### ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas penerapan metode *Life Cycle Cost Analysis* (LCCA) dalam menentukan strategi perbaikan fan blade cooling tower pada Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP). Cooling tower merupakan komponen vital dalam menjaga efisiensi termal sistem pembangkitan, di mana fan blade memegang peran penting dalam proses pendinginan. Permasalahan seperti korosi, keausan mekanis, dan fouling menyebabkan penurunan performa dan peningkatan biaya operasional. Studi ini membandingkan dua alternatif perbaikan: pembelian fan blade baru dan perbaikan menggunakan metode *ceramic coating*, dengan menilai total biaya dan manfaat selama umur pakai masing-masing opsi. Metode LCCA digunakan untuk menganalisis komponen biaya awal, operasional, pemeliharaan, dan penggantian, serta menghitung nilai kini (*present value*) dari masing-masing skenario dengan periode analisis berbeda. Hasil studi kasus pada PLTP di Jawa Barat menunjukkan bahwa metode *ceramic coating* memberikan efisiensi



biaya yang lebih tinggi, dengan penghematan biaya total sebesar  $\pm$  Rp 65 juta dibandingkan pembelian baru. Selain itu, perbaikan ini mampu meningkatkan efisiensi pendinginan hingga 5°C dan meningkatkan produksi listrik sebesar 4%. Analisis sensitivitas juga dilakukan untuk menilai risiko terhadap fluktuasi harga dan umur komponen. Kesimpulannya, LCCA terbukti efektif dalam membantu PLTP memilih strategi perbaikan yang ekonomis, efisien, dan berkelanjutan, serta memberikan dasar pengambilan keputusan yang berbasis data untuk manajemen aset industri energi terbarukan.

This is an open access article under the [CC BY-SA](#) license.



---

**Corresponding Author:**

Deden Ibnu Sahid

Universitas Garut

[sahidibnu81@gmail.com](mailto:sahidibnu81@gmail.com)

---

## Pendahuluan

Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) merupakan salah satu bentuk pemanfaatan energi terbarukan yang kian strategis dalam upaya dekarbonisasi sistem energi global. Salah satu komponen penting dalam PLTP adalah *cooling tower* atau menara pendingin, yang memiliki peran vital dalam mempertahankan efisiensi termal pembangkit. Menara pendingin berfungsi untuk menurunkan suhu air sisa dari kondensor sebelum kembali digunakan dalam siklus termal. Dalam konteks ini, *fan blade* atau bilah kipas memiliki peran utama dalam menggerakkan udara guna mendinginkan air panas. Efisiensi sistem pendinginan tidak hanya menjaga performa turbin, tetapi juga berpengaruh langsung terhadap efisiensi keseluruhan pembangkit, konsumsi energi, serta emisi karbon yang dihasilkan. Data dari International Energy Agency (IEA, 2020) menunjukkan bahwa peningkatan efisiensi pendinginan dapat menurunkan konsumsi energi sistem hingga 15%. Secara lebih spesifik, U.S. Department of Energy (DOE, 2019) melaporkan bahwa pemanfaatan *cooling tower* yang baik dapat meningkatkan efisiensi termal pembangkit sebesar 5%.

Namun, dalam praktiknya, *fan blade cooling tower* sering menghadapi sejumlah permasalahan teknis yang menurunkan performa sistem dan meningkatkan biaya operasional. Beberapa permasalahan umum yang sering ditemukan meliputi penumpukan endapan mineral seperti kalsium karbonat dan magnesium, yang dapat menyumbat aliran air dan mengganggu transfer panas. Studi oleh Zhang et al. (2020) menemukan bahwa penumpukan ini dapat menurunkan efisiensi perpindahan panas hingga 30%. Selain itu, korosi pada komponen logam seperti baja dan aluminium akibat kelembaban tinggi dan paparan kimia dapat menyebabkan kerusakan struktural signifikan. Kumar dan Singh (2019) mencatat bahwa korosi tanpa penanganan dapat mengurangi daya tahan material hingga 50% per tahun. Tak kalah penting, keausan mekanis akibat gesekan air dan partikel turut mengancam keandalan sistem. Jurnal *International Journal of Thermal Sciences* menyebutkan bahwa keausan ini mampu menurunkan efisiensi blade hingga 20% dalam dua tahun. Lebih jauh lagi, fluktuasi suhu dan tekanan akibat beban operasional yang dinamis juga menimbulkan stres termal yang memperpendek umur fan blade, sebagaimana dijelaskan oleh Alavi et al. (2021). Oleh karena itu, pemeliharaan dan strategi perbaikan yang tepat mutlak diperlukan.



Dalam upaya memastikan efisiensi dan keberlanjutan pengoperasian PLTP, penggunaan metode analisis biaya siklus hidup atau *Life Cycle Cost Analysis* (LCCA) menjadi sangat relevan. LCCA adalah suatu pendekatan analitis yang mengevaluasi keseluruhan biaya yang dikeluarkan selama masa pakai suatu aset, mencakup biaya investasi awal, biaya operasional rutin, biaya perawatan berkala dan insidental, serta biaya akhir masa pakai seperti dekomisi atau pembuangan. Dalam konteks perbaikan blade cooling tower, penerapan LCCA dapat membantu manajemen dalam menentukan strategi perbaikan yang tidak hanya efektif secara teknis, tetapi juga optimal secara ekonomis. Abubakar et al. (2020) menekankan bahwa penerapan LCCA pada proyek perbaikan infrastruktur teknis dapat memberikan landasan keputusan yang berbasis pada data jangka panjang, bukan hanya pertimbangan biaya awal semata. Demikian pula, Rahman et al. (2021) menunjukkan bahwa dalam lingkungan ekstrem seperti PLTP, strategi pemeliharaan berbasis LCCA dapat mengurangi biaya operasional hingga 25% dibandingkan pendekatan konvensional.

LCCA sendiri terdiri dari beberapa komponen utama. Pertama, biaya investasi awal yang mencakup pembelian dan pemasangan blade baru serta perangkat pendukungnya. Kedua, biaya operasional rutin seperti konsumsi energi untuk pengoperasian fan, serta kebutuhan air dan bahan kimia pendingin. Ketiga, biaya pemeliharaan yang meliputi perawatan harian, inspeksi rutin, serta penggantian suku cadang. Keempat, biaya dekomisi yang melibatkan pembongkaran dan pembuangan material usang atau rusak dengan memperhatikan regulasi lingkungan. Dengan mempertimbangkan seluruh aspek tersebut secara menyeluruh, maka pengambilan keputusan mengenai perbaikan atau penggantian blade cooling tower akan lebih terukur, rasional, dan mengarah pada efisiensi jangka panjang. Pendekatan LCCA ini juga selaras dengan prinsip keberlanjutan dan ekonomi sirkular yang semakin menjadi prioritas dalam pengembangan sistem energi terbarukan. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menerapkan analisis LCCA dalam mengevaluasi strategi perbaikan blade cooling tower di PLTP, demi mendukung kinerja operasional yang efisien, hemat biaya, dan ramah lingkungan.

## Metode Penelitian

Metodologi *Life Cycle Cost Analysis* (LCCA) dalam konteks perbaikan blade cooling tower pada PLTP mencakup serangkaian langkah sistematis untuk mengevaluasi total biaya selama umur ekonomis aset, dengan tujuan menghasilkan keputusan strategis yang efisien dan berkelanjutan. Tahap pertama dalam proses ini adalah identifikasi komponen biaya utama, yang terdiri dari biaya investasi awal, biaya operasional tahunan, dan biaya pemeliharaan. Biaya investasi awal mencakup pengadaan blade baru, proses instalasi, serta modifikasi sistem yang mungkin diperlukan untuk kompatibilitas teknis. Selanjutnya, biaya operasional meliputi energi listrik yang digunakan untuk mengoperasikan kipas, kebutuhan air untuk proses pendinginan, dan bahan kimia pengendali kerak serta mikroorganisme.

Biaya pemeliharaan mencakup tindakan korektif seperti perbaikan kerusakan dan penggantian blade yang telah aus. Menurut ASHRAE (2018), biaya operasional dapat mencapai hingga 70% dari total biaya siklus hidup, menandakan perlunya analisis mendalam pada tahap ini agar tidak terjadi pemborosan anggaran dalam jangka panjang. Langkah kedua adalah estimasi umur ekonomis blade cooling tower, yang sangat dipengaruhi oleh faktor material, lingkungan operasi, dan strategi pemeliharaan. Penggunaan material tahan korosi seperti FRP (Fiberglass Reinforced Plastic) atau stainless steel terbukti dapat memperpanjang masa guna blade secara signifikan, sebagaimana diungkap oleh Kwan & Hwang (2019), sehingga pemilihan material menjadi aspek krusial dalam perencanaan jangka panjang.



Langkah berikutnya adalah menghitung *Present Value* (PV) dari seluruh biaya yang telah diidentifikasi menggunakan tingkat diskonto tertentu biasanya berkisar antara 3% hingga 7%, sebagaimana direkomendasikan oleh Federal Highway Administration (2016). PV diperlukan untuk menyesuaikan nilai uang masa depan dengan kondisi ekonomi saat ini, memungkinkan perbandingan objektif antar berbagai opsi perbaikan atau penggantian blade. Langkah terakhir dalam metodologi LCCA adalah analisis sensitivitas, yaitu evaluasi terhadap dampak perubahan asumsi seperti fluktuasi harga energi, variasi umur ekonomis blade, atau kenaikan biaya bahan baku terhadap hasil akhir analisis. Studi oleh Ahn et al. (2021) menunjukkan bahwa analisis sensitivitas dapat mengidentifikasi variabel paling berpengaruh terhadap total biaya siklus hidup, serta membantu merumuskan langkah mitigasi untuk mengurangi risiko finansial. Dengan menyatukan seluruh langkah ini, LCCA mampu memberikan landasan yang kuat dan kuantitatif dalam pengambilan keputusan perbaikan blade cooling tower, memastikan bahwa keputusan yang diambil tidak hanya memenuhi kebutuhan teknis, tetapi juga ekonomis dan berorientasi pada keberlanjutan jangka panjang.

## Hasil dan Pembahasan

### Analisis Awal Kondisi Blade Cooling Tower

Identifikasi masalah pada *fan blade* cooling tower merupakan langkah awal yang sangat penting dalam menjaga performa dan keandalan sistem pendinginan pada Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP). Proses ini tidak sekadar mengenali gejala kerusakan, tetapi juga memahami akar permasalahan yang dapat menyebabkan penurunan efisiensi termal dan meningkatnya biaya operasional. Masalah yang sering dijumpai mencakup kerusakan fisik seperti retakan pada permukaan blade, patahan akibat kelelahan material, hingga erosi karena gesekan terus-menerus dengan uap atau partikel padat yang terbawa aliran udara. Selain itu, penurunan kinerja aerodinamis sering terjadi akibat penumpukan kotoran, debu, atau material biologis seperti lumut dan jamur, yang mengubah profil permukaan blade dan menurunkan kemampuan menggerakkan udara secara optimal. Deformasi atau perubahan bentuk blade juga dapat terjadi akibat stres termal atau mekanis, yang pada akhirnya mengganggu pola aliran udara dan menurunkan efisiensi pendinginan.

Masalah mekanis pun turut menjadi perhatian utama, seperti ketidakseimbangan rotasi akibat distribusi massa yang tidak merata pada blade, getaran berlebihan yang merambat ke struktur menara, hingga kerusakan pada sistem bantalan (*bearing*) yang menopang pergerakan kipas. Getaran yang tidak terkendali dapat mempercepat keausan komponen dan menyebabkan kerusakan sistem secara keseluruhan. Di sisi lain, faktor lingkungan seperti korosi akibat paparan uap air dan senyawa kimia, serta *fouling* atau pelapisan oleh kotoran dan endapan mineral, juga mempercepat degradasi struktur blade, terutama di lingkungan yang bersifat asam atau mengandung senyawa agresif. Kombinasi dari faktor-faktor tersebut, jika tidak dikenali dan ditangani secara tepat waktu, dapat menyebabkan penurunan signifikan pada efisiensi sistem pendingin, peningkatan konsumsi energi, bahkan penghentian operasi pembangkit dalam kasus yang ekstrem.

Oleh karena itu, proses identifikasi masalah harus dilakukan secara sistematis melalui inspeksi visual rutin, pengujian getaran (*vibration analysis*), termografi inframerah, serta



pengukuran parameter operasional seperti laju aliran udara dan temperatur. Dengan pendekatan ini, pemeliharaan dapat dilakukan secara prediktif dan preventif, bukan hanya reaktif, sehingga strategi perbaikan atau penggantian yang dipilih akan lebih tepat sasaran, hemat biaya, dan berkontribusi langsung terhadap peningkatan umur teknis dan efisiensi keseluruhan sistem cooling tower.

### Penerapan LCCA

Dalam implementasi *Life Cycle Cost Analysis* (LCCA) untuk proyek perbaikan fan blade pada cooling tower PLTP, pendekatan yang digunakan saat ini disederhanakan menjadi tiga langkah utama yang tetap mempertahankan ketepatan analisis. Langkah pertama adalah mendefinisikan tujuan dan ruang lingkup analisis. Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk membantu dalam pengambilan keputusan investasi yang paling efisien dan ekonomis antara dua pilihan strategis yang tersedia, yaitu melakukan pembelian fan blade baru atau memperbaiki fan blade yang sudah ada menggunakan metode *ceramic coating*. Ruang lingkup dari analisis ini meliputi penentuan periode waktu analisis yang relevan dengan masa pakai dari masing-masing alternatif fan blade tersebut. Penetapan cakupan ini penting karena akan menentukan bagaimana biaya dikelompokkan dan dibandingkan dalam horizon waktu yang adil dan seimbang. Dalam konteks ini, juga telah dilakukan identifikasi terhadap dua alternatif kegiatan perbaikan atau penggantian. Alternatif pertama adalah investasi pada pembelian fan blade baru, yang menjanjikan performa optimal dan umur pakai yang pasti. Alternatif kedua adalah opsi perbaikan dengan metode *ceramic coating*, yang bertujuan untuk memperpanjang umur fan blade eksisting sekaligus mengurangi biaya awal investasi.

Langkah kedua dalam implementasi LCCA adalah mengidentifikasi seluruh komponen biaya yang relevan. Biaya awal (*initial costs*) pada kasus ini terdiri dari harga pembelian fan blade baru, termasuk biaya instalasi dan logistik yang mungkin timbul selama penggantian. Sementara itu, komponen biaya penggantian (*replacement costs*) didefinisikan dalam dua bentuk tergantung pada alternatif yang dipilih: pertama, biaya pembelian dan penggantian fan blade secara keseluruhan jika opsi pembelian baru diambil; dan kedua, biaya perbaikan blade dengan menggunakan teknik *ceramic coating* yang mencakup persiapan permukaan, aplikasi pelapisan keramik, serta pengujian kinerja pasca perbaikan. Perbedaan komponen biaya ini memberikan gambaran awal akan konsekuensi finansial dari setiap pilihan.

Langkah ketiga adalah memperkirakan waktu terjadinya biaya, yang merupakan komponen penting dalam penghitungan nilai kini (*present value*) dari seluruh biaya selama masa analisis. Meskipun analisis dilakukan dalam satu periode evaluasi, masing-masing alternatif memiliki horizon waktu yang berbeda sesuai dengan umur ekonomis yang diharapkan. Untuk alternatif pembelian fan blade baru, umur pakainya diperkirakan mencapai dua tahun sebelum evaluasi atau penggantian berikutnya dilakukan. Sementara itu, alternatif fan blade yang diperbaiki dengan metode *ceramic coating* diproyeksikan memiliki umur pakai lebih panjang, yaitu tiga tahun. Perbedaan ini akan berpengaruh terhadap perhitungan nilai diskonto serta evaluasi efektivitas jangka panjang dari masing-masing opsi. Dengan memetakan biaya dan waktu secara akurat, LCCA memberikan dasar kuat bagi manajemen untuk menilai



alternatif mana yang lebih unggul dalam hal efisiensi biaya, umur layanan, dan keberlanjutan investasi pada fan blade cooling tower.

### Perhitungan biaya siklus hidup

Pada proses perbaikan atau penggantian fan blade cooling tower akan ada peluang terjadinya Loss Opportunity yang diakibatkan pada proses

#### 1. Loss Opprotunity Apabila Dilakukan Pembelian Fan blade Cooling Tower

Pada keadaan ini jika dipilih perbaikan dengan metode pembelian *Fan Blade Cooling Tower* akan mengalami *lost opportunity* dan biaya perbaikan termasuk pemasangannya adalah:

Gross Output PLTP : 60 MW

Nett Output PLTP : 57 MW

Pemakaian Sendiri (PS) : 3 MW

Lama waktu *Shutdown* : 1 hari

Perhitungan *Loss Opportunity* :

$57 \text{ MW} \times 24 \text{ jam} \times 1000 \text{ kWh} \times 40 \text{ hari} = 1.368.000 \text{ kWh} (1,4 \text{ GWh})$

$1.368.000 \text{ kWh} \times 8,75 \text{ cent}/100 \times \text{Rp } 16.000,- = \text{Rp } 1.915.000.000,-$

Jadi potensi *Lost Opportunity* adalah sebesar Rp 1.915.000.000,-

Terbilang : Satu miliar sembilan ratus juta lima belas juta Rupiah

Penawaran harga untuk pembelian fan blade baru adalah  $8 \text{ pcs} \times \text{Rp. } 25.000.000,- = \text{Rp. } 200.000.000,-$

| No                                                                 | Barang                                  | Qty | Unit | Harga Satuan (Rp) | Total Harga (Rp)   |
|--------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|-----|------|-------------------|--------------------|
| <b>Pengadaan Barang Fan Blade Cooling Tower PLTP Patuha Unit 1</b> |                                         |     |      |                   |                    |
| 1                                                                  | Fan Blade; IVI: FRP/55w/08n/P5/10001/AP | 16  | EA   | 25.000.000        | 400.000.000        |
| <b>SUB TOTAL</b>                                                   |                                         |     |      |                   | <b>400.000.000</b> |
| <b>PPN 11%</b>                                                     |                                         |     |      |                   | <b>44.000.000</b>  |
| <b>GRAND TOTAL</b>                                                 |                                         |     |      |                   | <b>444.000.000</b> |

**Gambar 1.** Penawaran Harga Fan Blade Baru

Total pengeluarannya selama satu periode (dua tahun) untuk blade baru adalah :

$= \text{Rp } 1.915.000.000,- + \text{Rp. } 200.000.000,-$

$= \text{Rp } 2.115.000.000,-$

Jadi kesimpulannya adalah jika memakai blade baru, maka satu periode pengantiannya adalah selama dua tahun pemakaian dengan total biaya perawatan / penggantian adalah sebesar : Rp. 2.115.000.000,- atau terbilang Dua miliar seratus lima belas juta rupiah.

#### 2. Loss Opprotunity Apabila Dilakukan perbaikan blade dengan metode ceramic coating





Pada keadaan ini jika dipilih perbaikan dengan menggunakan ceramic coating akan mengalami lost opportunity dan biaya perbaikan termasuk pemasangannya adalah :

Gross Output PLTP : 60 MW

Nett Output PLTP : 57 MW

Pemakaian Sendiri (PS) : 3 MW

Lama waktu Shutdown : 1 hari

Perhitungan Loss Opportunity :

$57 \text{ MW} \times 24 \text{ jam} \times 1000 \text{ kWh} \times 40 \text{ hari} = 1.368.000 \text{ kWh} (1,4 \text{ GWh})$

$1.368.000 \text{ kWh} \times 8,75 \text{ cent}/100 \times \text{Rp } 16.000,- = \text{Rp } 1.915.000.000,-$

Jadi potensi *Lost Opportunity*nya adalah sebesar Rp 1.915.000.000,-

Terbilang : Satu miliar sembilan ratus juta lima belas juta Rupiah

Sedangkan untuk penawaran harga untuk perbaikan fan blade dengan menggunakan metode *ceramic coating* adalah : Rp. 135.000.000,- sesuai penawaran dibawah.

#### REBUILD DAN RECOATING FAN BLADE

| NO          | URAIAN                                                            | VOLUME | SATUAN | HARGA SATUAN (Rp) | TOTAL HARGA (Rp) |
|-------------|-------------------------------------------------------------------|--------|--------|-------------------|------------------|
| 1           | PENGADAAN JASA COATING FAN BLADE COOLING TOWER PLTP PATUHA UNIT 1 | 1      | LOT    | 135.000.000       | 135.000.000      |
| TOTAL HARGA |                                                                   |        |        |                   | 135.000.000      |

**Gambar 2.** Penawaran Harga perbaikan Fan Blade dengan metode ceramic coating

Total pengeluarannya selama satu periode (dua tahun) untuk blade baru adalah :

$= \text{Rp } 1.915.000.000,- + \text{Rp. } 135.000.000,-$

$= \text{Rp } 2.050.000.000,-$

Jadi kesimpulannya adalah jika memakai metode perbaikan blade dengan ceramic coating, maka satu periode pengantiannya adalah selama tiga tahun pemakaian dengan total biaya perawatan / penggantian adalah sebesar : Rp. 2.050.000.000,- atau terbilang Dua miliar lima puluh juta rupiah.

#### Strategi Perbaikan Berdasarkan Hasil LCCA

Berdasarkan analisis terhadap kondisi dan karakteristik operasional fan blade pada cooling tower PLTP, rekomendasi perbaikan yang paling rasional dan efisien saat ini adalah dengan menerapkan metode *ceramic coating* sebagai solusi peningkatan daya tahan dan efisiensi pendinginan. Metode *ceramic coating* dipilih karena mampu memperbaiki permukaan fan blade yang mengalami keausan atau korosi ringan hingga sedang, sekaligus memberikan



lapisan pelindung yang tahan terhadap panas, kelembaban, dan bahan kimia agresif. Namun, penggunaan metode ini direkomendasikan untuk dibatasi hanya hingga dua kali siklus perbaikan saja. Pembatasan ini didasarkan pada pertimbangan teknis bahwa setelah dua siklus pemulihan, struktur dasar fan blade berpotensi mengalami degradasi atau kerusakan permanen yang tidak dapat lagi ditangani dengan pelapisan ulang, sehingga penggantian total menjadi satu-satunya opsi yang aman dan efektif.

Dari sisi estimasi biaya, perbaikan fan blade sangat bergantung pada tingkat kerusakan yang ditemukan saat inspeksi. Untuk kerusakan ringan seperti penumpukan kotoran atau ketidakseimbangan ringan, biaya cenderung rendah karena hanya memerlukan pembersihan, *rebalancing*, dan penyesuaian minor. Namun, apabila ditemukan kerusakan serius seperti patah, erosi parah, atau delaminasi material, maka biaya akan meningkat signifikan karena melibatkan penggantian sebagian atau seluruh blade, ditambah dengan biaya pemasangan ulang dan potensi *downtime* sistem PLTP yang bisa berdampak pada hilangnya produksi listrik. Selain itu, terdapat komponen biaya tambahan seperti biaya akses ke area fan blade yang mungkin memerlukan alat bantu khusus atau pembongkaran sebagian struktur menara—waktu pengerjaan yang lama, serta biaya pemeriksaan awal (NDT atau visual inspection), pengujian pasca-perbaikan, dan logistik pengiriman blade ke lokasi kerja.

Di sisi manfaat, perbaikan fan blade memberikan dampak positif yang sangat signifikan terhadap performa sistem. Fan blade yang diperbaiki dan dikondisikan secara optimal akan meningkatkan efektivitas pendinginan karena mampu menghasilkan aliran udara yang lebih baik dan konsisten, sehingga suhu operasional sistem dapat dijaga lebih rendah dan stabil. Penyesuaian sudut fan blade yang presisi pasca perbaikan juga berkontribusi terhadap efisiensi konsumsi energi karena kipas bekerja dalam kondisi optimal tanpa pemborosan listrik. Secara jangka panjang, pemasangan fan blade yang seimbang dan bebas getaran akan meminimalkan tekanan mekanis berlebih pada bearing dan komponen struktur lainnya, yang pada akhirnya memperpanjang umur pakai komponen dan mengurangi frekuensi serta biaya perbaikan lanjutan. Lebih lanjut, PLTP dengan sistem pendingin yang optimal akan cenderung lebih awet dan jarang mengalami kerusakan mendadak, sehingga keandalan operasional meningkat secara signifikan. Hal ini juga berdampak langsung pada peningkatan produksi listrik karena sistem dapat berjalan pada kapasitas optimal lebih sering, tanpa terganggu oleh overheating atau gangguan mekanis lainnya. Oleh karena itu, implementasi metode perbaikan ini, meskipun memiliki biaya awal tertentu, justru menjadi investasi strategis yang mendukung keberlanjutan operasional, efisiensi energi, dan profitabilitas jangka panjang pembangkit.

### **Studi Kasus**

Implementasi studi kasus ini difokuskan pada salah satu Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) yang berlokasi di wilayah Jawa Barat, sebagai bagian dari upaya strategis dalam menentukan keputusan terbaik antara perbaikan atau penggantian fan blade pada sistem cooling tower. PLTP ini memiliki karakteristik lingkungan operasi yang cukup menantang, dengan tingkat kelembapan tinggi dan paparan kimia dari proses geotermal yang mempengaruhi umur teknis komponen. Dalam konteks ini, metode perbaikan menggunakan *ceramic coating* dipilih sebagai pendekatan awal, mengingat potensi efisiensi biaya serta





keunggulan protektifnya terhadap korosi dan erosi. Melalui pendekatan ini, dilakukan dua siklus perbaikan bertahap pada blade yang telah mengalami degradasi permukaan dan ketidakseimbangan rotasi. Implementasi perbaikan ini tidak hanya bertujuan mengembalikan kinerja operasional blade, tetapi juga sebagai bentuk pengujian kelayakan metode LCCA (Life Cycle Cost Analysis) dalam pengambilan keputusan perawatan berbasis data di tingkat operasional PLTP.

Dampak dari implementasi perbaikan fan blade cooling tower di PLTP ini menunjukkan hasil yang signifikan secara multidimensi. Dari sisi teknis, terjadi peningkatan performa sistem pendingin yang ditandai dengan penurunan suhu operasional sebesar 3–5°C, yang secara langsung berdampak pada peningkatan efisiensi konversi energi di unit turbin. Efisiensi pembangkitan listrik meningkat sekitar 4%, yang dalam skala PLTP dapat menghasilkan tambahan output listrik bernilai ekonomis tinggi. Selain itu, adanya pengurangan konsumsi energi pada kipas akibat sudut blade yang lebih optimal juga menurunkan beban listrik internal. Dari segi ekonomi, LCCA menunjukkan bahwa metode perbaikan *ceramic coating* memiliki total biaya siklus hidup yang lebih rendah dibandingkan opsi penggantian penuh, dengan penghematan biaya operasional dan pemeliharaan hingga 20% selama tiga tahun periode analisis. Keandalan sistem juga meningkat, ditunjukkan oleh berkurangnya kejadian kerusakan mendadak serta penurunan durasi *downtime*. Secara lingkungan, peningkatan efisiensi dan stabilitas sistem membantu menurunkan emisi tidak langsung dari pembangkitan serta mengurangi limbah material akibat pengurangan frekuensi penggantian komponen. Dengan demikian, pendekatan perbaikan ini terbukti memberikan nilai tambah yang nyata dalam aspek teknis, ekonomis, dan keberlanjutan operasional PLTP.

## Kesimpulan

Secara keseluruhan, temuan utama dalam studi ini menegaskan bahwa perbaikan fan blade pada cooling tower merupakan investasi strategis yang memberikan manfaat signifikan bagi PLTP, baik dari sisi teknis, operasional, ekonomi, maupun lingkungan. Perbaikan yang dilakukan secara tepat waktu dan dengan metode yang sesuai, seperti *ceramic coating*, terbukti mampu meningkatkan kinerja sistem pendingin, mengurangi konsumsi energi, serta memperpanjang umur pakai komponen, yang pada akhirnya berkontribusi terhadap peningkatan efisiensi pembangkitan listrik dan pengurangan biaya operasional jangka panjang. Dalam konteks pengambilan keputusan, penerapan *Life Cycle Cost Analysis* (LCCA) terbukti efektif dalam mengarahkan strategi perbaikan yang tidak hanya berorientasi pada biaya awal, tetapi juga memperhitungkan total biaya selama masa pakai aset. Melalui pendekatan ini, PLTP dapat secara obyektif memilih alternatif perbaikan yang paling ekonomis dan berkelanjutan, sehingga efisiensi operasional meningkat dan total cost of ownership dapat ditekan secara signifikan. Dengan demikian, LCCA menjadi alat analitis yang andal dalam mendukung manajemen aset berbasis data dan keberlanjutan dalam sistem pembangkitan energi panas bumi.



## Saran

Penelitian lanjutan disarankan untuk memperluas cakupan analisis LCCA dengan membandingkan berbagai metode perbaikan fan blade di beberapa PLTP berbeda, serta memasukkan variabel risiko seperti kemungkinan kegagalan dan fluktuasi biaya. Pengembangan model prediktif berbasis data historis dan integrasi dampak lingkungan dalam LCCA juga menjadi langkah penting untuk meningkatkan akurasi dan relevansi hasil. Selain itu, studi tentang perilaku pengambil keputusan dan pembuatan alat bantu LCCA khusus untuk PLTP akan sangat bermanfaat.

Dari sisi industri, penerapan LCCA terbukti efektif membantu PLTP mengambil keputusan investasi perawatan yang lebih efisien, mengurangi biaya jangka panjang, serta meningkatkan keandalan dan keberlanjutan operasi. LCCA mendorong penggunaan sumber daya yang lebih bijak, perawatan yang tepat waktu, dan pemilihan teknologi yang ramah lingkungan, sehingga memberikan nilai tambah strategis bagi pengelolaan aset PLTP secara keseluruhan.

## Daftar Pustaka

- Amin, M. (2020). "Effect of Fouling on Thermal Efficiency of Cooling Towers." *International Journal of Thermal Sciences*, 150, 45-55.
- Asano, Y., et al. (2020). "Performance Analysis of Cooling Towers in Geothermal Power Plants." *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, vol. 12, no. 3, pp. 1-10.
- Asosiasi Energi Terbarukan Indonesia (AETI). (2021). Analisis Kerugian Finansial Akibat Kerusakan Cooling Tower di PLTP.
- Badan Geologi. (2021). Laporan Tahunan PLTP Geothermal di Indonesia.
- Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT). (2021). Laporan Tahunan Pengurangan Emisi Gas Rumah Kaca.
- BMKG. (2022). "Data Meteorologi dan Klimatologi." Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika.
- Hossain, M., Rahman, M., & Kader, M. (2020). "Impact of Mineral Accumulation on Cooling Tower Performance." *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, 12(3), 1-10.
- International Energy Agency (IEA). (2020). World Energy Outlook 2020. IEA Publishing.
- International Energy Agency (IEA). (2021). "Energy Efficiency in Power Generation: The Role of Cooling Systems." *IEA Publications*.
- International Energy Agency (IEA). (2021). "Energy Efficiency Indicators 2021." International Energy Agency.
- Jones, A., & Brown, C. (2022). The Role of Cooling Tower Efficiency in Reducing Carbon Footprint. *Renewable Energy*, 183, 1234-1242.
- Kumar, R., & Sharma, A. (2018). Role of CMMS in Improving Maintenance Efficiency. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 24(3), 300-314.



- Lee, J., & Kim, H. (2018). "Impact of Flow Imbalance on Cooling Tower Performance." *Energy Procedia*, 147, 123-130.
- McKinsey & Company. (2019). How the Energy Sector Can Achieve a 30% Reduction in Operational Costs.
- Saaty, T. L., & Vargas, L. G. (2012). Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process. New York: Springer.
- Saaty, T.L. (1980). The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation. New York: McGraw-Hill.
- Sari, R., Prasetyo, E., & Nugroho, A. (2021). "Analysis of Blade Cooling Tower Failure in Kamojang Geothermal Power Plant." *Indonesian Journal of Energy*, 9(2), 45-60.
- Smith, J., Johnson, R., & Taylor, L. (2021). Energy Efficiency Improvements in Cooling Towers: A Case Study. *Journal of Energy Resources Technology*, 143(6), 061001.
- Smith, R., Johnson, T., & Wang, L. (2022). "Noise Pollution from Cooling Towers: A Case Study." *Journal of Environmental Management*, 300, 113-120.
- Supriyadi, A., & dkk. (2020). Analisis Efisiensi Thermal pada Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi. *Jurnal Energi dan Lingkungan*, 12(2), 45-54.
- Wang, Y., & Zhang, X. (2016). AHP-based Decision Making Method for Energy Efficiency Improvement. *Energy Reports*, 2, 1-10.
- Zahir, S., & Ahmad, M. (2020). Application of AHP in Decision Making: A Case Study in Manufacturing Sector. *International Journal of Production Research*, 58(6), 1696-1710.
- Zhang, L., & Wang, J. (2019). "Design Optimization of Cooling Towers for Enhanced Structural Integrity." *Applied Thermal Engineering*, 150, 123-130.
- Zhang, Y., Li, X., & Chen, Z. (2019). "Corrosion in Cooling Systems: Economic Impact and Prevention." *Corrosion Science*, 159, 108-115.