

Perbandingan Life Cycle Cost Skema Perbaikan Dan Penggantian Diaphragm Pada PLTP

Deden Ibnu Sahid *¹
Minto Yuwono ²

^{1,2} Program Studi Magister Manajemen, Fakultas Manajemen, Universitas Garut
*e-mail: sahidibnu81@gmail.com¹, yuwono.minto@yahoo.com²

Abstrak

Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) merupakan sumber energi terbarukan yang membutuhkan pemeliharaan rutin agar tetap beroperasi secara efisien. Salah satu komponen krusial dalam sistem ini adalah Diaphragm, yang berfungsi mengatur aliran dan tekanan dalam turbin. Penelitian ini membandingkan biaya siklus hidup (life cycle cost) dari tiga metode perbaikan Diaphragm, yaitu aplikasi Ceramic Coating, pengelasan dan permesinan (welding & machining), serta penggantian material dengan peningkatan kadar Chromium (Cr) sebesar 9%. Studi kasus pada PT. XYZ menunjukkan bahwa setelah aplikasi Ceramic Coating pada tahun 2021, inspeksi tahun 2024 mengungkapkan adanya erosi signifikan, terutama pada tip seal dan outer ring. Erosi ini berdampak pada efisiensi turbin dan berpotensi menyebabkan catastrophic failure. OEM merekomendasikan penggantian Diaphragm dengan material yang lebih tahan erosi. Perbaikan sementara menggunakan Ceramic Coating hanya bertahan dua tahun, sementara metode welding & machining serta penggantian material dapat bertahan lebih dari lima tahun. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan rekomendasi strategis bagi pengelola PLTP dalam memilih metode perbaikan yang paling efektif dan ekonomis, guna meningkatkan efisiensi dan keandalan sistem.

Kata Kunci: PLTP, Diaphragm, Life Cycle Cost, Perawatan Turbin, Efisiensi Energi

Abstract

Geothermal Power Plants (PLTP) are a renewable energy source that requires regular maintenance to ensure efficient operation. One crucial component in this system is the Diaphragm, which regulates flow and pressure within the turbine. This study compares the life cycle cost of three Diaphragm repair methods: Ceramic Coating application, welding & machining, and material replacement with a 9% Chromium (Cr) upgrade. A case study at PT. XYZ revealed that after applying Ceramic Coating in 2021, a 2024 inspection identified significant erosion, particularly on the tip seal and outer ring. This erosion affects turbine efficiency and poses a risk of catastrophic failure. The OEM recommended replacing the Diaphragm with a more erosion-resistant material. Temporary repairs using Ceramic Coating last only two years, whereas welding & machining or material replacement methods can last over five years. The findings of this research are expected to provide strategic recommendations for PLTP operators in selecting the most effective and economical repair method to enhance system efficiency and reliability.

Keyword: PLTP, Diaphragm, Life Cycle Cost, Turbine Maintenance, Energy Efficiency

PENDAHULUAN

Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) memainkan peran penting dalam transisi energi global menuju sumber daya yang lebih berkelanjutan. Energi panas bumi memiliki keunggulan dibandingkan sumber energi terbarukan lainnya karena mampu menghasilkan listrik secara kontinu tanpa tergantung pada kondisi cuaca. Menurut International Renewable Energy Agency (IRENA, 2021), kapasitas terpasang PLTP di seluruh dunia telah mencapai lebih dari 15 gigawatt, dengan potensi pengembangan yang masih sangat besar. Di Indonesia sendiri, sebagai negara dengan potensi panas bumi terbesar kedua di dunia, pengembangan PLTP terus didorong untuk mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan mendukung pencapaian target bauran energi nasional.

Dalam sistem PLTP, salah satu komponen utama yang berperan dalam efisiensi dan keandalan operasional adalah steam turbine. Turbin uap bekerja dengan memanfaatkan energi panas dari uap untuk menggerakkan generator listrik. Salah satu bagian krusial dalam turbin ini

adalah diaphragm, yang berfungsi sebagai pemisah aliran uap antar-tingkat serta mengarahkan uap dengan optimal menuju sudu-sudu turbin. Kondisi diaphragm yang baik sangat penting dalam menjaga efisiensi turbin, mengurangi kehilangan energi, serta memperpanjang umur operasional sistem secara keseluruhan (Sihombing, 2020).

Seiring waktu, diaphragm dapat mengalami penurunan performa akibat keausan, erosi, atau kelelahan material yang disebabkan oleh tekanan dan suhu tinggi dalam operasi PLTP. Jika tidak ditangani dengan baik, kerusakan pada diaphragm dapat menurunkan efisiensi turbin, meningkatkan konsumsi energi, serta memicu gangguan operasional yang berujung pada downtime dan kerugian finansial yang besar (Ewar et al., 2023). Oleh karena itu, pemeliharaan dan perbaikan diaphragm menjadi aspek krusial dalam pengelolaan PLTP untuk memastikan performa yang optimal dan biaya operasional yang efisien.

Dalam industri pembangkitan listrik, terdapat dua strategi utama dalam menangani kerusakan diaphragm, yaitu perbaikan (repair) dan penggantian (replacement). Masing-masing strategi memiliki kelebihan dan tantangan tersendiri. Perbaikan umumnya lebih ekonomis dalam jangka pendek dan dapat memperpanjang umur pakai komponen tanpa investasi besar. Namun, dalam beberapa kasus, perbaikan berulang dapat mengurangi keandalan sistem dalam jangka panjang. Sebaliknya, penggantian diaphragm dengan unit baru memberikan keandalan yang lebih baik tetapi membutuhkan investasi awal yang lebih besar. Oleh karena itu, analisis yang mendalam terhadap biaya dan manfaat dari masing-masing metode sangat diperlukan sebelum mengambil keputusan.

Pendekatan yang dapat digunakan untuk mengevaluasi keputusan antara perbaikan dan penggantian adalah analisis biaya siklus hidup atau Life Cycle Cost (LCC). LCC mencakup seluruh biaya yang dikeluarkan selama masa pakai suatu aset, mulai dari pengadaan, operasional, pemeliharaan, hingga penghapusan aset tersebut (Mazaya & Kurniawan, 2022). Dalam konteks diaphragm, analisis ini tidak hanya mempertimbangkan biaya awal pengadaan dan perbaikan, tetapi juga biaya pemeliharaan berkala, kehilangan efisiensi akibat degradasi komponen, serta potensi biaya tambahan akibat kegagalan sistem yang lebih luas. Oleh karena itu, LCC menjadi alat yang sangat penting dalam pengambilan keputusan strategis terkait pemeliharaan dan penggantian komponen di PLTP.

Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan beberapa metode perbaikan dan penggantian diaphragm dengan mempertimbangkan faktor biaya dan performa dalam jangka panjang. Salah satu tantangan utama dalam analisis LCC adalah memperoleh data yang akurat dan relevan untuk memastikan hasil analisis yang dapat diandalkan. Oleh karena itu, penelitian ini akan menggunakan berbagai sumber informasi, seperti laporan industri, studi kasus dari PLTP yang telah menerapkan strategi pemeliharaan tertentu, serta wawancara dengan profesional di bidang pembangkitan energi panas bumi.

Dengan adanya penelitian ini, diharapkan dapat memberikan panduan yang lebih komprehensif bagi pengelola PLTP dalam menentukan strategi pemeliharaan dan penggantian diaphragm yang paling efektif dan efisien. Dengan memahami biaya dan manfaat dari setiap metode, operator PLTP dapat mengoptimalkan pengeluaran mereka, meningkatkan efisiensi operasional, serta mendukung keberlanjutan dan keandalan sistem energi panas bumi dalam jangka panjang. Selain itu, hasil penelitian ini juga dapat menjadi referensi bagi pemangku kepentingan dalam merancang kebijakan pemeliharaan aset PLTP yang lebih strategis dan berbasis data.

Secara keseluruhan, studi ini akan berkontribusi dalam meningkatkan efektivitas operasional PLTP dengan memberikan wawasan mengenai strategi pengelolaan komponen kritis dalam sistem turbin uap. Dengan pendekatan berbasis analisis LCC, diharapkan keputusan yang diambil oleh operator PLTP dapat lebih terukur, efisien, dan sesuai dengan kebutuhan industri pembangkitan listrik berbasis energi panas bumi yang terus berkembang.

TINJAUAN PUSTAKA

Definisi Life Cycle Cost

Life Cycle Cost (LCC) adalah penjumlahan dari total biaya yang dikeluarkan selama siklus hidup dari suatu asset, mulai dari perencanaan, pengadaan, operasi, pemeliharaan hingga penghapusan asset. Menurut Ashworth dan Hogg (2007), LCC mencakup semua biaya terkait dengan asset, termasuk biaya awal, biaya operasional dan juga biaya pemeliharaan. Konsep ini penting dalam pengambilan keputusan investasi, terutama dalam industry energi, dimana biaya operasional dan pemeliharaan dapat mempengaruhi profitabilitas jangka Panjang.

Peran Diaphragm dalam Turbin Uap

Diaphragm merupakan komponen penting dalam turbin uap yang berfungsi untuk mengarahkan aliran uap dan meningkatkan efisiensi konversi energi. Menurut Hodge (2010), keausan pada Diaphragm dapat mengakibatkan penurunan efisiensi dan peningkatan konsumsi energi. Oleh karena itu, pemeliharaan dan penggantian Diaphragm secara berkala sangat penting untuk menjaga kinerja turbin.

Metode Perbaikan dan Penggantian Diaphragm

Beberapa metode perbaikan Diaphragm telah diusulkan, termasuk Ceramic Coating, pengelasan dan permesinan sampai penggantian komponen. Namun semua metode perbaikan ini akan ekonomis jika perbaikannya dilakukan tidak menambah waktu overhaul. Penggantian mungkin diperlukan jika Diaphragm sudah sangat aus atau tidak dapat diperbaiki atau juga menimbulkan kehilangan operasi yang lama sehingga menimbulkan kerugian operasi yang besar.

Studi Terkait LCC dalam Pembangkit Listrik

Beberapa penelitian telah mengevaluasi LCC dari berbagai skema pemeliharaan dan penggantian dalam konteks pembangkit tenaga listrik. Misalnya penelitian Kumar dan Singh (2018) menunjukkan bahwa Analisa LCC dapat membantu dalam memilih antara perbaikan dan penggantian berdasarkan biaya jangka panjang. Penelitian ini menekankan pentingnya mempertimbangkan factor-faktor seperti umur pakai, biaya operasional dan efisiensi dalam analisis LCC.

Perbandingan Skema Perbaikan dan Penggantian

Perbandingan antara skema perbaikan dan penggantian Diaphragm telah dilakukan dalam beberapa studi. Pada saat ini perbandingan dilakukan berdasarkan waktu perbaikan yang menggunakan beberapa metode dan termasuk pembelian Diaphragm baru.

Konteks Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi

Pembangkit listrik tenaga panas bumi memiliki karakteristik unik pada setiap unit, sehingga mempengaruhi keputusan pemeliharaan. Menurut Mulyadi dan Setiawan (2020), Kondisi operasi yang ekstrim dan korosif di dalam pembangkit dapat mempercepat keausan komponen, termasuk Diaphragm. Oleh karena itu, analisis LCC yang mempertimbangkan kondisi spesifik ini sangat penting untuk menentukan strategi pemeliharaan yang optimal.

Tinjauan pustaka ini menunjukkan bahwa analisis life cycle cost merupakan alat penting dalam pengambilan keputusan terkait perbaikan dan penggantian Diaphragm pada turbin uap di pembangkit listrik tenaga panas bumi. Dengan mempertimbangkan berbagai metode perbaikan dan penggantian, serta kondisi spesifik dari pembangkit, penelitian ini bertujuan untuk memberikan wawasan yang lebih baik dalam memilih skema yang paling ekonomis dan efisien.

METODE

Metodologi penelitian ini terdiri dari beberapa tahap, mulai dari pengumpulan data hingga analisis biaya siklus hidup. Pertama, kami akan melakukan tinjauan pustaka untuk mengidentifikasi berbagai metode perbaikan dan penggantian Diaphragm yang biasa digunakan dalam industri PLTP. Data yang dikumpulkan akan mencakup informasi mengenai biaya, umur pakai, dan performa dari masing-masing metode. Selain itu, kami juga akan mencari studi kasus yang relevan untuk memberikan konteks yang lebih dalam mengenai penerapan metode tersebut.

Setelah mengumpulkan data, tahap berikutnya adalah analisis biaya siklus hidup. Kami akan menghitung total biaya yang terkait dengan setiap metode, termasuk biaya awal, biaya pemeliharaan, dan biaya operasional.

Analisis selanjutnya yang akan dilakukan adalah menggunakan metode perbandingan kuantitatif dan kualitatif. Metode kuantitatif akan melibatkan perhitungan biaya siklus hidup secara numerik, sedangkan metode kualitatif akan mencakup evaluasi faktor non-ekonomi yang dapat mempengaruhi keputusan, seperti dampak lingkungan dan keandalan operasional. Dengan pendekatan ini, kami berharap dapat memberikan gambaran yang komprehensif mengenai keuntungan dan kerugian dari masing-masing metode.

Setelah analisis selesai, hasil akan disajikan dalam bentuk tabel dan grafik untuk memudahkan pemahaman. Kami juga akan menyertakan diskusi mengenai implikasi dari hasil penelitian, termasuk rekomendasi untuk pengelola PLTP dalam memilih metode yang paling sesuai berdasarkan analisis biaya siklus hidup. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya akan memberikan data yang berguna, tetapi juga dapat dijadikan sebagai panduan praktis untuk pengelolaan Diaphragm di PLTP.

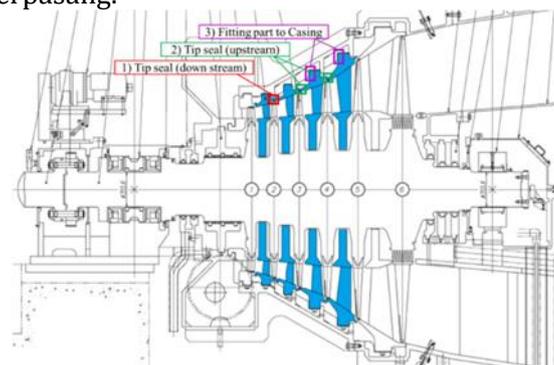
Akhirnya, penelitian ini akan diakhiri dengan kesimpulan yang merangkum temuan utama dan saran untuk penelitian lebih lanjut. Dengan demikian, diharapkan penelitian ini dapat berkontribusi pada pengetahuan yang ada mengenai pemeliharaan dan penggantian Diaphragm di PLTP, serta memberikan manfaat bagi industri energi terbarukan secara keseluruhan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada saat ini ada beberapa skema atau metode yang bisa dilakukan untuk mengatasi keadaan dari Diaphragm yang terpasang adalah perbaikan dengan menggunakan Ceramic Coating, perbaikan dengan menggunakan pengelasan dan pemesinan juga termasuk penggantian Diaphragm. Semua skema pekerjaan tadi memiliki resiko kehilangan operasi. Pada pembahasan ini akan ditampilkan hasil analisis dari biaya yang kemungkinan akan dikeluarkan untuk perbaikan dan pembelian Diaphragm juga termasuk resiko kehilangan operasi.

Kajian finansial dilakukan dengan menghitung loss/profit opportunity dengan perbandingan antara penggantian Diaphragm dengan menggunakan Diaphragm baru dan dengan melakukan perbaikan Diaphragm. Kajian ini dilakukan hanya pada loss/profit yang didapatkan dari kehilangan hari produksi. Jasa pekerjaan dan material belum termasuk dalam perhitungan ini dikarenakan tidak adanya data detail sehingga dapat berpotensi menyebabkan kekeliruan. Harga listrik dan kurs ini sesuai dengan RKAP 2025 yaitu untuk harga listrik sebesar 8,75 ¢/kWh dan kurs sebesar Rp 15.650,-

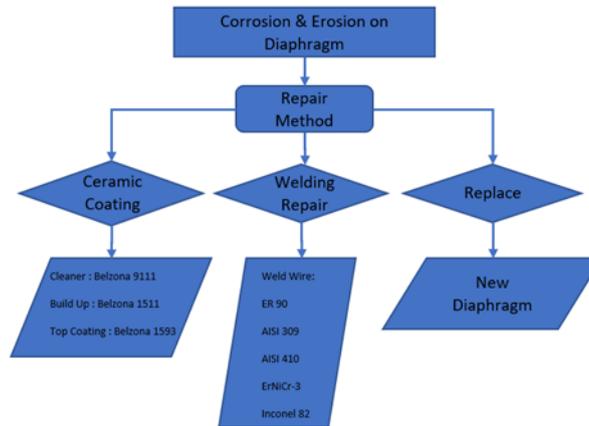
Di bawah ini adalah gambar potongan dari Steam Turbin yang menunjukkan posisi dari semua Diaphragm yang terpasang.



Gambar 1. Potongan dari Steam Turbin



Gambar 2. Keadaan Terakhir Diaphragm yang Terpasang



Gambar 3. Metode Perbaikan dan Penggantian Diaphragm

Di bawah ini adalah gambar potongan dari Steam Turbin yang menunjukkan posisi dari semua Diaphragm yang terpasang.

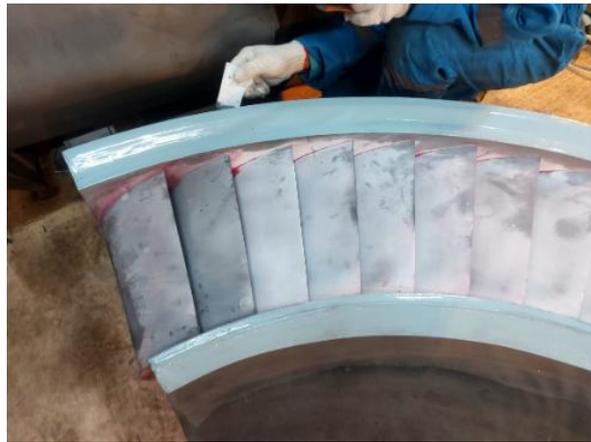
1. Skema Perbaikan dengan Menggunakan Ceramic Coating

Pembangkit ini sudah beroperasi selama sepuluh tahun, selama operasi ini pembangkit sudah mengalami beberapa kali proses minor overhaul dan Major Overhaul. Didalam pelaksanaan kegiatan overhaul setelah dipastikan ada temuan kerusakan pada Diaphragm, biasanya dilakukan juga perbaikan pada Diaphragm. Pada unit ini sudah beberapa kali dilakukan perbaikan yang dikarenakan terdapat erosi pada bagian outerring dan Inner Ring dari Diaphragm. Pada pelaksanaan Overhaul ditahun 2019 mulai ditemukan erosi pada Diaphragm yang terpasang, akan tetapi pihak OEM masih mengkategorikan keadaan tersebut aman dan tidak perlu dilakukan perbaikan pada Diaphragm.

Berdasarkan temuan pada tahun 2019 pada pelaksanaan Minor Overhaul tahun 2021 dilakukan metode perbaikan dengan metode Ceramic Coating menggunakan Belzona® 1511 dan Belzona®1513 yang didesain untuk memperbaiki erosi yang pada Diaphragm dan melindungi dari korosi yang menyebabkan erosi kembali.



Gambar 4. Kegiatan Perbaikan dengan Memakai Metode Ceramic Coating 1



Gambar 5. Kegiatan Perbaikan dengan Memakai Metode Ceramic Coating 2

Sebagai data tambahan terlampir data penawaran perbaikan Diaphragm dengan menggunakan Ceramic Coating. Pelaksanaan perbaikan dengan metode ini tidak menyebabkan langsung kehilangan produkdi dikarenakan pelaksanaannya pada waktu dilakukan Overhaul pada Steam Turbin.

Payment Term: 2010 - 30 days		RFQ Number:		//2023		
Delivery Term:		Remarks: RFP No. 061/		21 Februari 2023		
Item	Material Number	Description	Delivery Date	Qty	Unit	Amount
00001		Diaphragm Rebuilding & Metal Coating The item covers the following services: 01 Jasa Turbine Diaphragm Rebuild and Metal Co 02 Akomodasi, Transportasi dan Laporan	01.09.2023	1	AU	298.000.000
				1	AU	263.040.300
				1	AU	32.954.250

Gambar 6. Data penawaran harga untuk perbaikan

2. Skema Perbaikan dengan Metode Pengelasan dan Permesinan

Proses perbaikan pada Diaphragm yang juga bisa kita lakukan adalah melakukan perbaikan dengan menggunakan metode pengelasan pada area Diaphragm yang erosi. Kegiatan perbaikan ini bertujuan untuk merekondisi area yang sudah erosi dengan metode pengelasan yang menggunakan material sama atau upgrade dari material Diaphragm.



Gambar 7. Proses Perbaikan Diaphragm Di Pihak Ke-3 1



Gambar 8. Proses Perbaikan Diaphragm Di Pihak Ke-3 2

Perbaikan Diaphragm hanya dapat dilakukan pada Overhaul dikarenakan tidak tersedianya Diaphragm cadangan. Oleh karena itu durasi perbaikan akan menyebabkan penambahan waktu overhaul. Perbaikan Diaphragm akan memakan waktu sebanyak 10 minggu atau 70 hari sehingga perhitungan kehilangan produksi adalah sebagai berikut:

Tabel 1. Perhitungan Kehilangan Produksi

Daya Netto	57,00 MW
Harga jual per kWh	8,75 ¢/kWh
Nilai tukar USD terhadap Rupiah	Rp 15.650 per USD
Repair <i>Diaphragm</i>	10 Minggu (70 hari kalender)
Potensi kehilangan produksi	$57 \times 1.000 \times 24 \times 70 = 95.760.000 \text{ kWh}$
Kehilangan penghasilan	$95.760.000 \text{ kWh} \times (8,75/100) \times \text{Rp } 15.650 = \text{Rp. } 131.131.350.000,-$

Perhitungan diatas menggunakan asumsi bahwa 70 hari tersebut digunakan untuk mobilisasi ke workshop, welding job, NDT, machining, inspeksi dan demobilisasi untuk Diaphragm STG2 – STG5. Perhitungan diatas belum termasuk biaya jasa perbaikan Diaphragm dan ketersediaan kontraktor.

3. Penggantian Diaphragm

Pada saat pelaksanaan Overhaul pada tahun 2021 ada juga kegiatan Remaining Life Assessment (RLA) oleh LEMTEK UI. Berdasarkan laporan RLA tersebut pada halaman 102, disarankan untuk mempertimbangkan pembelian spare Diaphragm dengan grade material lebih tinggi misalnya material dengan kandungan chromium (Cr) 9% atau lebih. Senada dengan LEMTEK UI, OEM dari Steam Turbin juga mengusulkan untuk hal yang sama yaitu dengan menambahkan kandungan Cr menjadi 9% atau lebih pada material Diaphragm. Seperti terlampir dibawah.

ENGINEERING COMMUNICATION SHEET

1. Finding from 2021 outage

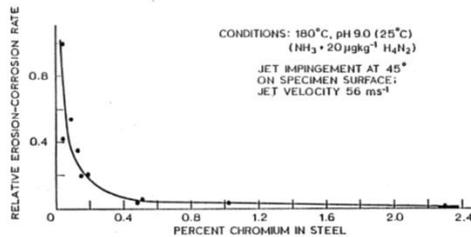
An erosion/corrosion damage had been observed on the diaphragms in previous outages. From 2021 outage, the progress of the damage was observed. As an example, the photo of STG4 diaphragm is shown in Figure.1 below. Especially on blue circled area, some amount of material wasted due to erosion/corrosion damage. A schematic diagram of the damaged condition is shown in Figure.2. A material waste was observed on carbon steel portion.



Gambar 9. Engineering Communication Sheet Dari Original Equipment Manufacturing (OEM) 1

3. Recommended countermeasure

Toshiba recommends to replace the diaphragms which have a higher resistance characteristic to erosion/corrosion damage. The considerable material upgrade on diaphragm ring is an application of high (around 9%) chromium steel. The effect of percentage chromium in steel to the erosion/corrosion resistance characteristic is shown in Figure.4. With an inclusion of chromium in steel, the resistance characteristic increase drastically.



Ph. Berge, J. Ducreux, P. Saint-Paul, Effect of Chemistry on Corrosion-Erosion of Steels in Water and Wet Steam, Water Chemistry of Nuclear Reactor System 2, British Nuclear Energy Society, 1981

Figure.4 Relevance between percent chromium in steel and erosion/corrosion rate (for reference)

Gambar 10. Engineering Communication Sheet dari Original Equipment Manufacturing (OEM) 2

No	Item Description	Quantity	Unit Price	Total Price
1	STG 1	1 LOT	Rp 5.832.940.000	Rp 5.832.940.000
2	STG 2	1 LOT	Rp 7.395.730.000	Rp 7.395.730.000
3	STG 3	1 LOT	Rp 7.161.680.000	Rp 7.161.680.000
4	STG 4	1 LOT	Rp 10.305.080.000	Rp 10.305.080.000
5	STG 5	1 LOT	Rp 12.138.820.000	Rp 12.138.820.000
TOTAL EXLUDE VAT 11%			Rp	42.834.250.000

Gambar 11. Penawaran Harga Untuk Pengadaan Diaphragm dari OEM

Proses pemasangan Diaphragm baru tetap akan ada penambahan waktu untuk instalasi Diaphragm baru selama 4 hari. Maka perhitungan kehilangan produksi adalah sebagai berikut:

Tabel 2. Perhitungan Kehilangan Produksi Baru

Daya Netto	57,00 MW
Harga jual per kWh	8,75 ¢/kWh
Nilai tukar USD terhadap Rupiah	Rp 15.650 per USD
Repair Diaphragm	4 hari
Potensi kehilangan produksi	$57 \times 1.000 \times 24 \times 4 = 5.472.000$ kWh
Kehilangan penghasilan	$5.472.000 \text{ kWh} \times (8,75/100) \times \text{Rp } 15.650 = \text{Rp } 7.493.220.000,$

Jadi potensi kehilangan produksi jika kita melakukan pembelian Diaphragm baru akan tetap muncul karena ada kegiatan penyesuaian dudukan Diaphragm baru ke Casing dari Turbin. Potensi kehilangannya muncul sebesar Rp. 7.493.220.000,-.

Pada skema terakhir ini jika dilakukan tidak akan terjadi kehilangan operasi karena dilakukan penggantian Diaphragm pada saat dilakukan Overhaul. Akan tetapi jika kita tidak melakukan perbaikan dan penggantian, akan timbul resiko terjadinya Catastrophic

Failure yang bisa menyababkan resiko kehilangan keuangan yang sangat besar seperti terlampir dibawah.

Rencana Pengadaan Diaphragm Turbin ini diadakan berdasarkan hasil finding/temuan pada saat Overhaul 2024 dan untuk menjaga kehandalan turbin saat beroperasi. Apabila pengadaan ini tidak dilakukan dan terjadi catastrophic failure maka PLTP Patuha akan memiliki loss opportunity produksi sebesar:

Tabel 3. Loss Opportunity Produksi

Gross Output PLTP	60 MW
Nett Output PLTP	57 MW
Pemakaian Sendiri (PS)	3 MW
Lama Waktu Shutdown	24 bulan / 730 hari

Perhitungan Loss Opportunity dilakukan dengan mengalikan daya netto sebesar 57 MW dengan 24 jam operasi per hari, dikonversi ke kWh, dan dikalikan dengan durasi shutdown selama 730 hari, sehingga total kehilangan produksi mencapai 998.640.000 kWh (998,6 GWh). Jika dikalikan dengan harga jual listrik sebesar 8,75 cent per kWh dan nilai tukar Rp 15.000 per USD, maka total kehilangan pendapatan mencapai Rp 1.310.715.000.000,-. Perhitungan diatas menggunakan asumsi jika terjadi catastrophic failure akibat dari terlepasnya bagian Diaphragm dan mengenai bagian turbin lainnya seperti Rotor dan Diaphragm lainnya sehingga terjadi plant shutdown untuk perbaikan Rotor dan penggantian Diaphragm. Perhitungan diatas belum termasuk biaya spare part dan jasa perbaikan turbin.

KESIMPULAN

Penelitian ini memberikan wawasan yang mendalam tentang perbandingan biaya siklus hidup dari berbagai metode perbaikan dan penggantian Diaphragm pada pembangkit listrik tenaga panas bumi. Dengan menganalisis data dari berbagai sumber dan studi kasus, kami menemukan bahwa metode inovatif seperti penggunaan Ceramic Coating menawarkan keuntungan signifikan dalam hal efisiensi biaya dan perbaikan sementara juga keputusan untuk melakukan pembelian Diaphragm baru dengan menambahkan 9% Cr. Namun, keputusan untuk memilih metode tertentu harus mempertimbangkan berbagai faktor, termasuk anggaran, ketersediaan sumber daya, dan dampak lingkungan.

Dari sisi keuangan, pembelian Diaphragm dengan menggunakan Cr 9% merupakan pilihan yang tepat, karena pengeluarannya biayanya lebih sedikit dibandingkan metode yang lain, juga lebih bisa menambah lama jarak waktu antara Overhaul ke Overhaul, yang biasanya dilakukan setiap dua tahun jadi bisa dilakukan 3 tahun dengan asumsi Diaphragm yang terpasang masih belum mengalami erosi.

Akhirnya, penelitian ini membuka jalan bagi penelitian lebih lanjut mengenai inovasi dalam pemeliharaan dan penggantian komponen di PLTP. Dengan terus mengeksplorasi teknologi dan metode baru, industri energi terbarukan dapat meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan, serta memenuhi permintaan energi yang terus meningkat di masa depan.

DAFTAR PUSTAKA

- Mazaya, A., & Kurniawan, T. (2022). Collaborative Governance Pemanfaatan Energi Panas Bumi Sebagai Sumber Pembangkit Listrik (Studi Kasus Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi Dieng, Jawa Tengah). *Jurnal Inovasi Penelitian*, 3(4), 5731-5740.
- Ewar, H. A., Nasar, A., & Ika, Y. E. (2023). Pengembangan alat peraga pembangkit listrik tenaga panas bumi (pltp) sebagai media pembelajaran fisika pada materi sumber energi terbarukan. *OPTIKA: Jurnal Pendidikan Fisika*, 7(1), 128-139.

Sihombing, C. (2020). Analisa Efisiensi Termal Turbin, Kondensor dan Menara Pendingin pada Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi. Swara Patra: Majalah Ilmiah PPSDM Migas, 10(1), 5-12.