

Design and implementation of TOF (Tool Open Fan) to improve maintenance efficiency of exhaust fan in the gland steam condenser at steam power plants

Deden Ma'mun Sajaah^{a,1}, Aulia Ramadhan^a, Dodi Sofyan Arief^a

^aProgram Studi Teknik Mesin, Universitas Riau, Pekanbaru, 28293

¹deden.mamun7130@grad.unri.ac.id

Abstract. This paper presents the design and implementation of TOF (Tool Open Fan) as an innovative solution to enhance the maintenance efficiency of exhaust fans in gland steam condensers (GSC) at coal-fired steam power plants. Conventional disassembly with puller tools often caused mechanical damage to the fan surface, leading to costly replacements and up to 38 days of downtime. The TOF tool was designed with an adjustable house, fixed house, and jack bolt mechanism to provide safe, ergonomic, and efficient fan disassembly. Finite element simulations were conducted to analyze stress distribution on both the tool and the fan. Implementation at PLTU Tenayan demonstrated a significant reduction in maintenance duration, from 9 hours to 3 minutes, and reduced manpower from five to two workers. Financially, the innovation generated savings of approximately IDR 104,500,000 per exhaust fan by avoiding unnecessary replacements. The study concludes that TOF offers both economic and safety benefits, contributing to power plant reliability and sustainable maintenance practices. Limitations include the need for additional design adjustments to ensure compatibility with different GSC configurations across power plants.

Keywords: gland steam condenser, exhaust fan, maintenance tool, TOF, power plant efficiency

Received: 30 September 2025; **Presented:** 9 October 2025; **Publication:** 9 March 2026

DOI: <https://doi.org/10.71452/xh6jk497>

PENDAHULUAN

PLTU Tenayan memiliki posisi yang strategis karena merupakan pembangkit terbesar di Provinsi Riau dan menjadi andalan bagi ketersediaan listrik untuk wilayah Riau dengan berkontribusi dalam suplai listrik sebesar 34% untuk Provinsi Riau dan 4% untuk Pulau Sumatera. Gland steam condenser (GSC) merupakan equipment yang memiliki peran penting dalam pengoperasian PLTU yang berfungsi sebagai tempat kondensasi seal steam turbin. Seal steam adalah uap perapat pada labirin turbin yang berfungsi untuk mencegah masuknya udara luar ke turbin dan keluarnya main steam ke udara luar. Pada prinsipnya, seal steam bersirkulasi menuju GSC yang bertekanan negatif (vacuum) karena adanya exhaust fan yang beroperasi secara kontinu dan memanfaatkan air kondensat yang masuk pada sisi GSC tube sebagai media pendingin seal steam turbin. Pada GSC terdapat 2 exhaust fan yang salah satunya bersifat redundan atau spare jika terjadi kerusakan pada exhaust fan yang sedang beroperasi.

Proses disassembly dan assembly exhaust fan merupakan scope wajib dalam melaksanakan pemeliharaan atau perbaikan pada exhaust fan GSC. Timbulnya cacat pada exhaust fan merupakan hal yang dapat terjadi saat proses disassembly. Celah pada suction exhaust fan yang sempit, tidak adanya akses untuk menahan fan agar tidak berputar, dan tidak adanya alat khusus merupakan permasalahan yang ada dalam proses disassembly exhaust fan pada GSC.

Berdasarkan kondisi riil di lapangan, penggunaan treker sebagai alat eksisting merupakan satu-satunya alat yang digunakan untuk disassembly exhaust fan. Celah sempit pada inner exhaust fan tidak memungkinkan untuk pemasangan alat eksisting sehingga alat dipasang pada suction exhaust fan. Penggunaan alat eksisting tersebut mengharuskan proses pemanasan pada exhaust fan, setting jaw treker secara berulang dan penggunaan media lain untuk menahan exhaust fan agar tidak berputar akibat keterbatasan akses pada exhaust fan. Adanya kesulitan dalam penggunaan alat eksisting saat proses disassembly exhaust fan, menyebabkan waktu pekerjaan selama 12 jam serta man power sebanyak 5 orang.

Timbulnya cacat atau kerusakan pada exhaust fan dalam proses disassembly merupakan hal yang tidak dapat dihindari akibat tingginya tekanan yang timbul saat menggunakan alat eksisting. Hal ini menyebabkan exhaust fan tidak dapat digunakan kembali untuk pengoperasian GSC serta mengharuskan proses pengadaan exhaust fan yang baru sebesar Rp 104.500.000 dalam waktu 30 hari. Hal inilah yang menginspirasi penelitian ini untuk membuat sebuah alat yang dapat memudahkan disassembly exhaust fan GSC sehingga waktu pelaksanaan menjadi lebih singkat dan tidak merusak exhaust fan. Penulis merancang alat mekanik TOF (Tool Open Fan) dengan komponen *adjustable house* berkunci, *fix house*

sebagai media penggerak, serta jack bolt sebagai poros tumpuan yang memungkinkan disassembly exhaust fan dengan cepat, aman, dan bebas kerusakan. Penelitian ini bertujuan untuk mempercepat durasi pemeliharaan exhaust fan pada GSC dan mengurangi risiko kerusakan fan serta menghemat biaya pemeliharaan. Tujuan ini penting untuk menjaga keandalan sistem pendukung PLTU Tenayan dan mencegah gangguan operasional yang disebabkan oleh tidak tersedianya exhaust fan.

Heat Exchanger (HE)

HE secara umum adalah salah satu komponen yang dipasang pada sistem industri atau khususnya pada sistem tenaga uap untuk menukar atau memindahkan panas dari suatu fluida ke fluida yang lain dengan tujuan mendapatkan peningkatan nilai ekonomis. Fluida dalam HE di mana panasnya dipindahkan bisa berupa gas-gas; gas-air; air-air dan air-gas. Pada sistem PLTU, gas buang dengan temperatur cukup tinggi sebelum dilepas ke udara bebas dipindahkan dulu panasnya untuk memanaskan udara pembakaran batubara. Ini adalah perpindahan panas dari fluida gas ke fluida gas pula (gas-gas). Uap bekas setelah meninggalkan turbin uap dengan temperatur masih tinggi digunakan untuk memanaskan air pengisi ketel (uap-air). Air pendingin rumah turbin dengan temperatur kurang lebih 90 °C didinginkan dengan air (air-air). Antara media yang dipanaskan dan yang memanaskan pada umumnya dibatasi oleh media solid untuk menjaga agar keduanya tidak bercampur.

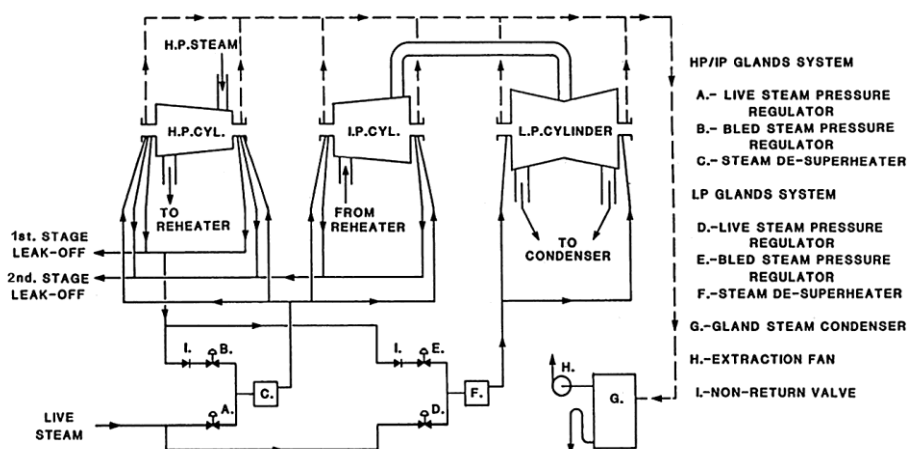
Luasan kontak perpindahan panas serta waktu kontak dan koefisien perpindahan panas bahan merupakan parameter efisiensi dari HE. Parameter ini menjadi dasar bagi para desainer HE dalam mengembangkan berbagai tipe HE yang sekarang ini banyak digunakan

dalam industri. Jenis fluida di dalam HE juga menjadi pertimbangan dalam mengembangkan desain. Semakin besar temperatur rata-rata pada tube, maka semakin besar nilai perpindahan panas. Temperatur rata-rata fluida berbanding lurus dengan koefisien perpindahan panas [1].

Gland Steam Condenser (GSC)

Di dalam sistem perapat turbin, uap sebagai media perapat pada turbin harus bersirkulasi (mengalir) secara kontinu. Setelah memberi perapat di dalam labyrinth seal, uap ini menjadi basah dan cenderung terkondensasi karena tekanannya sangat rendah. Oleh karena itu, uap perapat ini dialirkan ke kondensor uap gland (Gland Steam Condenser) untuk didinginkan menjadi air, kemudian kondensatnya dialirkan ke kondensor utama.

Gland Steam Condenser (GSC) mendapat pendinginan dari aliran air kondensat yang akan dipompakan menuju ketel uap (Boiler), sehingga air kondensat yang akan digunakan kembali sebagai air pengisi ketel uap akan mendapat manfaat terpanasi oleh uap perapat di dalam GSC yang berfungsi sebagai heat exchanger. Oleh karena itu, kondensor ini terletak pada jalur sistem air kondensat. Untuk memudahkan uap perapat mengalir ke GSC, dipasang exhaust fan di atasnya. Fan ini berfungsi untuk membuang gas/udara dan membuat GSC sedikit vakum. Di dalam mengoperasikan sistem gland steam, yang pertama dioperasikan adalah exhaust fan, buka drain, alirkan uap gland, kemudian tutup drain. Kegagalan seal steam system dapat menyebabkan korosi pada turbin dan menyebabkan turunnya nilai vakum turbin yang memengaruhi efisiensi pembangkit [2].



Gambar 1. Sistem Perapat Turbin [2]

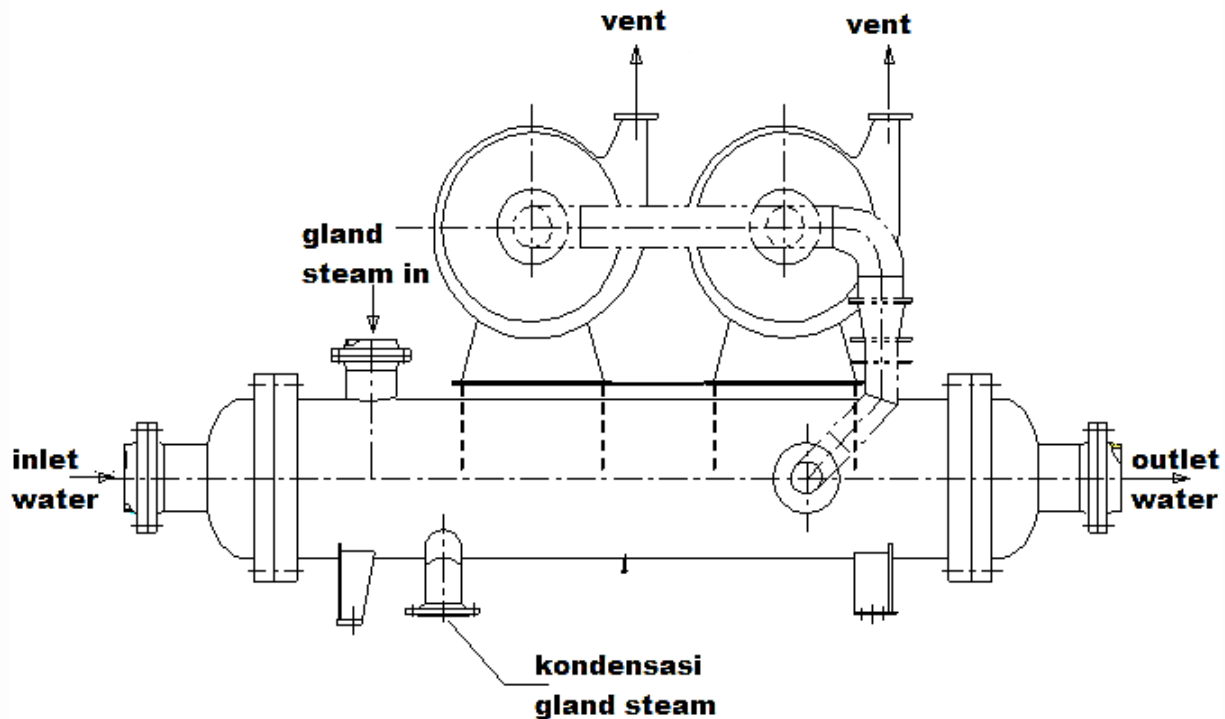
Bagian-bagian Gland Steam Condenser (GSC)

Bagian-bagian terpenting dari Gland Steam Condenser adalah sebagai berikut :

Shell & Tube : merupakan bagian GSC yang berfungsi sebagai media perpindahan panas. Shell and Tube terdiri dari beberapa pipa yang dilewatkan oleh aliran fluida. Satu set pipa berisi fluida yang akan dipanaskan atau didinginkan, sedangkan fluida yang

lain berfungsi sebaliknya, mengalir melalui sisi pipa tersebut.

- Water box : media penampung uap yang telah terkondensasi.
- Exhaust fan : menciptakan kondisi vakum pada gland steam condenser dan mengondensasikan uap dari seal steam turbin.



Gambar 2. Sistem Perapat Turbin [2]

METODOLOGI

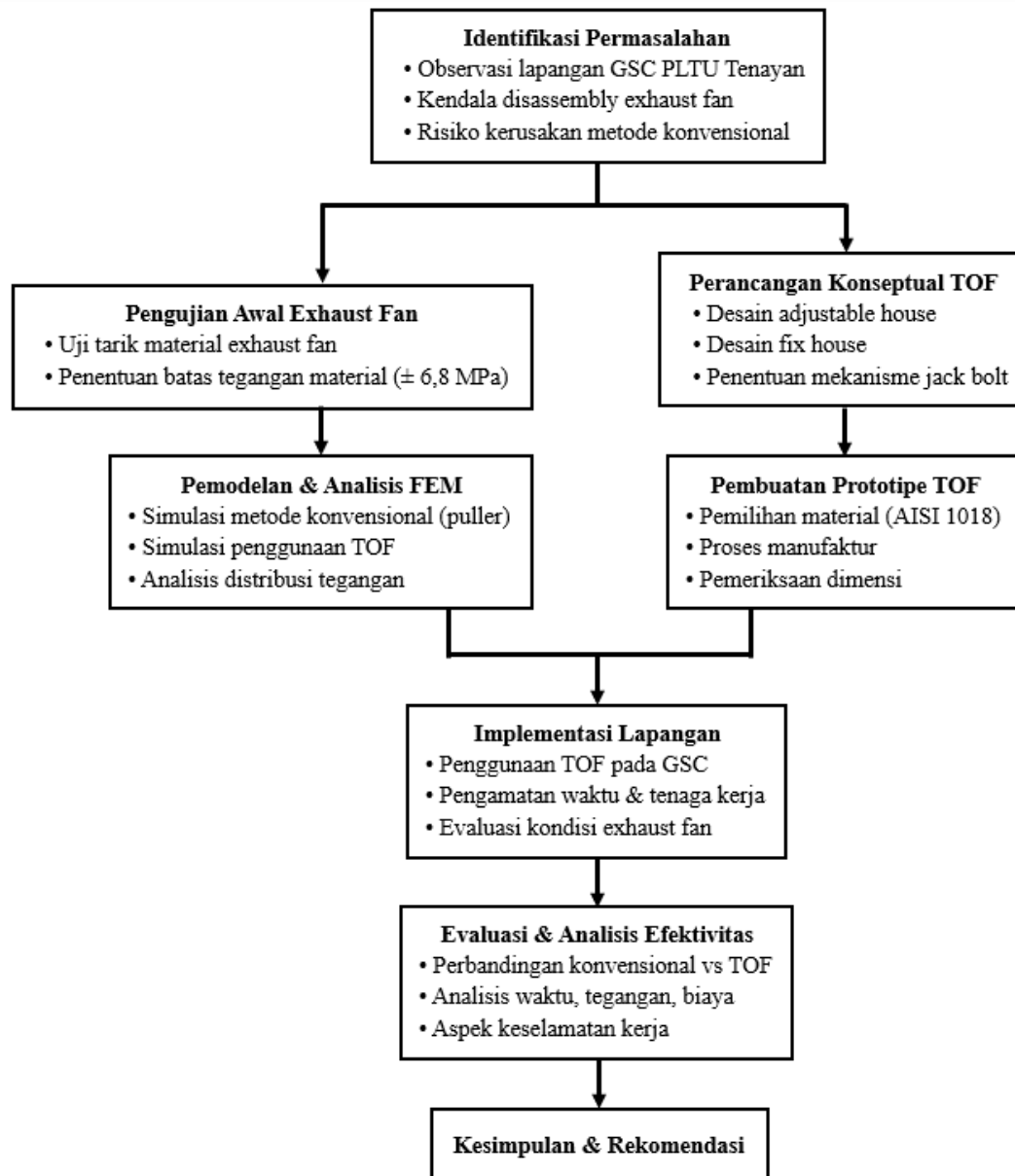
Penelitian ini dilaksanakan melalui enam tahap sistematis sebagai berikut:

Identifikasi Permasalahan (Observasi Lapangan di PLTU Tenayan)

Dilakukan observasi langsung di unit GSC PLTU Tenayan untuk memahami kendala operasional terkait proses disassembly exhaust fan. Fokus pengamatan meliputi penggunaan puller, akses atau celah yang

sempit, penggunaan pemanasan, pengencangan ulang jaw, risiko putaran fan yang tidak terkendali, serta potensi kerusakan fisik pada exhaust fan. Data dianalisis untuk mengidentifikasi kebutuhan inovasi dalam proses pemeliharaan yang lebih aman dan efisien.

Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan, timbulnya cacat atau kerusakan pada exhaust fan yang memiliki ketebalan material sebesar 2,3 mm mulai terjadi saat diberi tekanan 1000 psi atau 6,8 MPa.



Gambar 3. Diagram Alir Tahapan Penelitian TOF (*Tool Open Fan*)

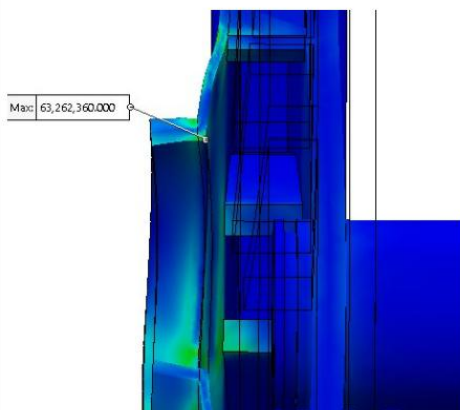


Gambar 4. Kerusakan exhaust fan



Gambar 5. Uji tarik pada exhaust fan

Melalui analisis pemodelan yang dilakukan, nilai tegangan maksimal yang terjadi pada exhaust fan sebesar 63 MPa pada bagian dinding exhaust fan akibat dorongan dari tracker saat proses disassembly. Sehingga proses disassembly exhaust fan menggunakan treker tidak relevant untuk dilakukan akibat tegangan yang ditimbulkan $> 6,8$ MPa.

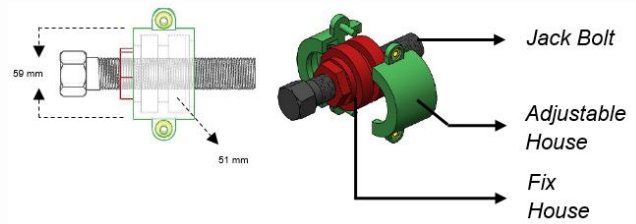


Gambar 6. Analisa pemodelan tegangan pada exhaust fan

Perancangan Konseptual TOF (Tool Open Fan)

Berdasarkan hasil observasi, dibuat desain awal alat TOF sebagai solusi praktis. Desain konseptual mencakup tiga komponen utama: adjustable house dengan baut pengunci untuk menahan fan, fixed house sebagai media penggerak adjustable, dan poros jack bolt sebagai tumpuan stabilisasi. Skema mekanik ini dirancang agar memungkinkan proses pelepasan yang ergonomis, stabil, dan bebas dari kerusakan. Berikut ini adalah bagian-bagian TOF seperti terlihat pada gambar 6 di atas :

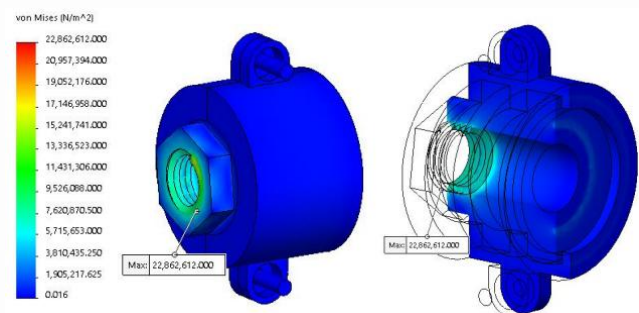
1. Adjustable house : berfungsi sebagai pengait exhaust fan.
2. Fix house : berfungsi untuk menarik adjustable house.
3. Jack bolt : tumpuan penarik fan keluar searah axial poros penggerak.



Gambar 7. Desain TOF

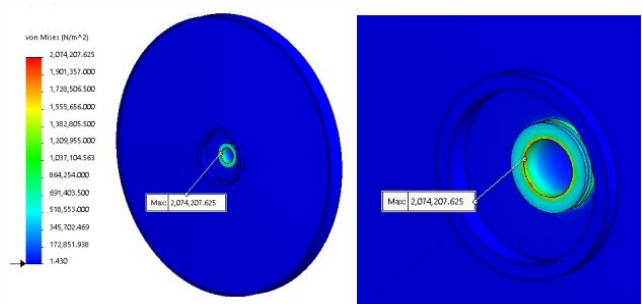
Analisis Elemen Hingga (FEM)

Desain konseptual diuji melalui simulasi FEM untuk mengevaluasi distribusi tegangan pada kedua bagian: alat TOF dan exhaust fan. Analisis ini penting untuk memastikan bahwa gaya yang diberikan tidak melebihi batas keamanan material. Metode serupa telah digunakan dalam studi exhaust fan lainnya, misalnya untuk menilai tegangan dan frekuensi natural blade fan rotor menggunakan FEM untuk mencegah resonansi berbahaya



Gambar 8. Pemodelan Stress TOF

Simulasi dilakukan untuk mengetahui nilai stres/tegangan yang dialami oleh material TOF dan exhaust fan. Nilai tegangan maksimal yang terjadi pada TOF sebesar 23 MPa. Nilai tersebut terjadi pada bagian ulir yang digunakan untuk menarik tool yang bergesekan langsung dengan dinding fan ketika proses disassembly



Gambar 9. Pemodelan Stress TOF

Nilai tegangan maksimal yang terjadi pada fan sebesar 2 MPa. Nilai tersebut terjadi pada bagian inner exhaust fan akibat tarikan dari special tool TOF saat proses disassembly.

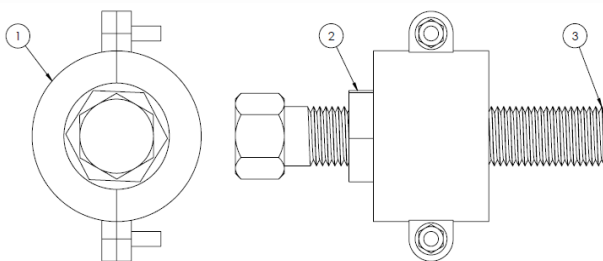
Secara teknis, penurunan distribusi tegangan dari 63 MPa pada metode konvensional menjadi sekitar 2 MPa pada penggunaan TOF disebabkan oleh perbedaan mekanisme pembebanan.

Pada metode konvensional yang menggunakan puller, gaya pelepasan bekerja secara terlokalisasi pada dinding tipis exhaust fan, sehingga menimbulkan konsentrasi tegangan yang tinggi dan berpotensi melampaui batas elastis material.

Sebaliknya, metode TOF dirancang untuk mendistribusikan gaya secara aksial dan merata melalui penggunaan adjustable house dan jack bolt. Mekanisme ini mencegah pemusatan beban pada satu titik tertentu dan secara signifikan menurunkan konsentrasi tegangan pada dinding exhaust fan, sebagaimana ditunjukkan oleh hasil simulasi metode elemen hingga (FEM) yang menghasilkan tegangan maksimum sekitar 2 MPa.

Pembuatan Prototipe

Prototipe TOF diproduksi menggunakan material baja karbon AISI 1018, yang dikenal memiliki kekuatan tarik dan ketangguhan yang cukup untuk mendukung gaya mekanik dalam kondisi pemeliharaan. Tahap ini mencakup proses manufaktur, pengecekan dimensi, dan pengamanan kualitas agar alat siap untuk uji lapangan.



Gambar 10. Komponen TOF

Tabel 1. Material komponen TOF

No	Nama	Qty	Spesifikasi
1	Adjustable house	1	Carbon steel AISI 1018
2	Fix house	1	Carbon steel AISI 1018
3	Jack bolt	1	Baut M 24

Implementasi Lapangan dan Uji Performa

Prototipe diuji langsung pada unit GSC PLTU Tenayan. Prosedur penggunaan alat, pemasangan pada fan, stabilisasi melalui jack bolt, serta pengawasan proses disassembly diamati. Data penggunaan durasi, tenaga kerja, kondisi fan pasca-disassembly dikumpulkan dan dibandingkan terhadap metode konvensional untuk menilai efektivitas TOF.



Gambar 11. Implementasi TOF

Dalam implementasinya, proses penggunaan TOF dapat dilihat pada tabel 2 seperti berikut:

Tabel 2. Implementasi TOF

No	Deskripsi	Evidence
1	Melepas cover the exhaust fan	

No	Deskripsi	Evidence
2	Pemasangan <i>adjustable house TOF</i> pada <i>inner exhaust fan</i> sisi bawah	
3	Peletakan <i>fix house TOF</i> pada <i>adjustable house</i> sisi bawah dan mengunci memutar <i>jack bolt</i> ke sisi dalam hingga menyentuh <i>shaft exhaust fan</i>	
4	Pemasangan <i>adjustable house TOF</i> pada <i>inner exhaust fan</i> sisi atas	
5	Pemasangan baut pengunci <i>adjustable house TOF</i>	

Evaluasi dan Analisis Efektivitas

Berdasarkan data lapangan (work order), dilakukan evaluasi menyeluruh, termasuk analisis waktu

pemeliharaan, jumlah tenaga kerja. Berikut evaluasi dan monitoring sebelum dan sesudah implementasi TOF dapat dilihat pada tabel 3. berikut:

Tabel 3. Evaluasi Implementasi TOF

NO	Work Order	Description	Durasi	Man Power	Keterangan
1	WO10990	Inspeksi Fan GSC unit 1	9 jam	5	Metode Konvensional (Puller)
2	WO17453	Rekomendasi CBM, GSC #1B, Vibrasi Tinggi	17 menit	3	TOF (Tool Open Fan)
3	WO25609	Perbaikan GSC unit 2	5 menit	2	TOF (Tool Open Fan)
4	WO17396	Seal cover gland steam cooler exhaust fan 2B bocor	3 menit	2	TOF (Tool Open Fan)
5	WO17399	Gland Seal Exhaust Fan #1A sisi lower fan Bocor / mengeluarkan air	4 menit	2	TOF (Tool Open Fan)

NO	Work Order	Description	Durasi	Man Power	Keterangan
6	WO18292	Gland steam cooler exhaust fan 1A tidak bisa dioperasikan (Thermal overload aktif)	3,2 menit	2	TOF (Tool Open Fan)
7	WO29653	Rekomendasi CBM, GSC #2B, Indikasi Bearing RUrak	3 menit	2	TOF (Tool Open Fan)
8	WO31634	GSC Fan 2A Gagal Start	3,1 menit	2	TOF (Tool Open Fan)
9	WO34555	PAM Listrik : Perbaikan GSC 2A	3 menit	2	TOF (Tool Open Fan)
10	WO34577	PAM Listrik : Perbaikan GSC 1A	2,8 menit	2	TOF (Tool Open Fan)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Implementasi TOF (Tool Open Fan) sebagai alat bantu disassembly exhaust fan pada gland steam condenser (GSC) di PLTU Tenayan menunjukkan hasil yang sangat signifikan dibandingkan dengan metode konvensional menggunakan puller. Hasil pengujian di lapangan memperlihatkan penurunan drastis dalam durasi pekerjaan dari sekitar 9 jam menjadi hanya ± 3 menit, serta pengurangan jumlah tenaga kerja dari 5 orang menjadi 2 orang. Perubahan ini secara jelas meningkatkan efisiensi operasional dan mengurangi kebutuhan sumber daya manusia secara substansial. Selanjutnya, analisis distribusi tegangan menggunakan metode elemen hingga (FEM) mengungkap hasil yang mendukung aspek keamanan penggunaan TOF. Tegangan maksimum yang dialami oleh exhaust fan saat menggunakan puller konvensional mencapai 63 MPa, yang sangat berpotensi menyebabkan kegagalan material. Sebaliknya, dengan penerapan TOF, tegangan ini berkurang drastis menjadi sekitar 2 MPa,

sehingga memungkinkan fan untuk dilepas tanpa terjadi kerusakan, mendemonstrasikan keandalan desain TOF dan keunggulan aplikatifnya. Studi serupa pada distribusi tegangan dan analisis struktur exhaust fan melalui FEM juga ditemukan dalam penelitian terkait optimasi desain fan menggunakan FEM. Aspek ekonomi juga menunjukkan hasil luar biasa. Analisis finansial memperkirakan penghematan hingga Rp 104.500.000 per unit fan, karena pemeliharaan tidak lagi membutuhkan penggantian unit yang rusak. Dengan demikian, TOF tidak hanya menghemat waktu dan tenaga, tetapi juga menekan pengeluaran operasional secara signifikan. Selain manfaat efisiensi dan ekonomi, TOF juga meningkatkan aspek keselamatan dan ergonomi kerja. Proses disassembly menjadi lebih terkendali, minim risiko kecelakaan, beban fisik pekerja berkurang, dan prosedur menjadi lebih aman. Kombinasi efisiensi, penghematan, dan keselamatan memberikan gambaran jelas bahwa TOF merupakan solusi inovatif dan berkelanjutan untuk pemeliharaan exhaust fan di GSC.

Tabel 4. Perbandingan pemeliharaan exhaust fan (Konvensional vs TOF)

Parameter	Metode Konvensional (Puller)	TOF (Tool Open Fan)
Durasi Pemeliharaan	± 9 jam	± 3 menit
Tenaga Kerja	5 orang	2 orang
Tegangan Maksimal (FEM)	± 63 MPa	± 2 MPa
Biaya Pemeliharaan	Rp 104.500.000 (penggantian)	Hampir nihil
Aspek Keselamatan	Risiko tinggi, beban kerja berat	Risiko rendah, ergonomis

KESIMPULAN

Penelitian ini menyimpulkan bahwa perancangan dan implementasi TOF (Tool Open Fan) secara signifikan meningkatkan efisiensi proses pemeliharaan exhaust fan pada gland steam condenser. TOF mampu mengurangi durasi pelepasan hingga 98%, menekan kebutuhan tenaga kerja, dan menghilangkan risiko

kerusakan fan. Inovasi ini berkontribusi pada penghematan biaya dan peningkatan keandalan operasi PLTU. Penelitian lanjutan disarankan untuk melakukan pengembangan desain agar sesuai dengan berbagai konfigurasi GSC di pembangkit lain.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan apresiasi kepada seluruh pihak yang terlibat, khususnya PLTU Tenayan dan

Universitas Riau, atas dukungan yang diberikan dalam pelaksanaan serta penyelesaian penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M.R. Hidayat dan A. Mursadin, “Analisis Perpindahan Panas Gland Steam Condenser di PT PJB UBJOM Pulang Pisau Kalteng,” Banjarbaru, 2020.
- [2] Z. Mazur et al., “Numerical Modeling of Gland Seal Erosion in a Geothermal Turbine,” Mexico, 2004.
- [3] Dongfang Turbine, Operation Manual for Turbine Equipment, China, 2015.
- [4] F. Jamil et al., “Application of advanced energy storage materials in direct solar desalination: A state of the art review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 186, 2023. doi: 10.1016/j.rser.2023.113663.