

Evaluasi Beban Statis Poros Turbin Kaplan Pada Sistem Pompa Hidrolis Menggunakan Metode *Finite Element Analysis* (FEA)

Haykal Alshan Muzakki^{1*}, Udin Komarudin², Adhita Prasetya³

Email corresponding author: haykalmuzakki@gmail.com

¹Prodi Sarjana Teknik Mesin, Universitas Widyatama Bandung Jl. Cikutra No. 204 A
Kota Bandung, Jawa Barat, Indonesia, 40124

^{2,3}Fakultas Teknik, Universitas Widyatama Bandung Jl. Cikutra No. 204 A
Kota Bandung, Jawa Barat, Indonesia, 40124

Article history: Received: 19 Maret 2026 | Revised: 15 April 2026 | Accepted: 23 April 2026

Abstract. *The turbine shaft is a critical component in hydraulic pump systems as it transmits mechanical energy from the turbine to the pump and experiences combined loads during operation. This study aims to evaluate the structural safety of the turbine shaft geometry under operational loading conditions using the Finite Element Analysis (FEA) method. A three-dimensional shaft model was developed based on actual field measurements and analyzed using SolidWorks Simulation with a torsional load of 6.016×10^3 Nm calculated from a turbine power of 157.5 kW and a rotational speed of 250 rpm. The shaft material used was SCM4 (AISI 4140). Simulation results show a maximum von Mises stress of 75 MPa with a safety factor of 8.27 relative to the material yield strength. The maximum displacement of 0.4 mm and maximum strain of 2.9×10^{-4} remain within the elastic range of the material. The results indicate that the shaft design is theoretically safe under static loading; however, indications of wear observed in the field suggest the influence of long-term mechanical degradation during operation.*

Keywords – Turbine shaft; Hydraulic pump; Finite Element Analysis; Von Mises; Deformation

Abstrak. *Poros turbin merupakan komponen kritis pada sistem pompa hidrolis karena berfungsi mentransmisikan energi mekanik dari turbin ke pompa serta menerima kombinasi beban selama operasi. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi keamanan desain geometris poros turbin terhadap kondisi pembebanan operasional menggunakan metode Finite Element Analysis (FEA). Model tiga dimensi poros dibuat berdasarkan dimensi aktual hasil pengukuran lapangan dan dianalisis menggunakan SolidWorks Simulation dengan pembebanan torsi sebesar $6,016 \times 10^3$ Nm yang dihitung dari daya turbin 157,5 kW dan putaran 250 rpm. Material poros yang digunakan adalah SCM4 (AISI 4140). Hasil simulasi menunjukkan tegangan Von Mises maksimum sebesar 75 MPa dengan faktor keamanan sebesar 8,27 terhadap tegangan luluh material. Nilai perpindahan maksimum sebesar 0,4 mm dan regangan maksimum sebesar $2,9 \times 10^{-4}$ masih berada dalam batas elastik material. Hasil penelitian menunjukkan bahwa desain poros secara teoritis aman terhadap pembebanan statik, namun indikasi keausan pada area tertentu menunjukkan adanya pengaruh degradasi mekanis selama operasi jangka panjang.*

Kata Kunci – Poros turbin; Pompa Hidrolis; Finite Element Analysis; Von mises; Deformation

PENDAHULUAN

Pompa turbin hidrolis banyak digunakan pada sistem distribusi fluida industri dan infrastruktur air karena kemampuannya bekerja pada kondisi debit dan head tertentu secara kontinu. Prinsip kerja sistem fluida sendiri didasarkan pada hukum *Pascal*, di mana tekanan yang diberikan pada fluida dalam ruang tertutup akan diteruskan sama besar ke segala arah, sehingga memungkinkan terjadinya transmisi energi dari penggerak ke fluida kerja [1], [2]. Dalam sistem pompa industri, energi mekanik dari motor atau turbin diteruskan ke fluida melalui rotor atau impeller dengan bantuan poros sebagai elemen transmisi utama [3].

Di antara seluruh komponen pompa, poros penggerak (*shaft*) merupakan salah satu elemen paling kritis karena berfungsi sebagai penghubung langsung antara motor dan turbin Kaplan serta menerima kombinasi beban torsi, lentur, dan aksial selama operasi berlangsung [4]. Dalam sistem transmisi daya, ketiga jenis beban tersebut bekerja secara simultan dan menghasilkan kondisi tegangan gabungan (*combined stress*) yang kompleks, sehingga desain poros harus mampu menjamin kekuatan dan keandalannya selama umur operasi [4], [5]. Kegagalan poros tidak hanya menyebabkan penghentian operasi pompa, tetapi juga berpotensi menimbulkan kerusakan lanjutan pada komponen lain seperti *bearing*, *sleeve*, dan *impeller* [6].

Berbagai penelitian terdahulu menunjukkan bahwa kegagalan poros pompa umumnya dipicu oleh konsentrasi tegangan pada area kritis, seperti fillet radius, perubahan diameter, *keyway*, serta daerah kontak dengan komponen

lain. Kondisi tersebut dapat mempercepat inisiasi retakan mikro yang berkembang akibat pembebanan berulang selama operasi [7]. Getaran sistem, *misalignment*, serta kondisi pelumasan yang kurang baik juga dilaporkan dapat menurunkan efisiensi dan mempercepat keausan poros, sehingga meningkatkan risiko kegagalan mekanik [2].

Selain faktor tegangan dan kelelahan material, beberapa studi melaporkan bahwa kegagalan poros juga dapat terjadi akibat mekanisme keausan yang dipicu oleh interaksi antara poros dan komponen pendukung, seperti sleeve atau bantalan [4], [8], [9]. Ketidaksesuaian suaian (fit), clearance yang tidak optimal, serta adanya defleksi atau getaran poros selama operasi dapat menyebabkan terjadinya kontak berulang antara poros dan sleeve. Dalam jangka panjang, kondisi ini dapat mengakibatkan keausan progresif, penurunan diameter efektif poros, serta melemahnya kemampuan poros dalam menahan beban operasional, meskipun nilai tegangan kerja masih berada di bawah batas luluh material. Mekanisme kegagalan semacam ini sering kali tidak teridentifikasi hanya melalui evaluasi tegangan statik, sehingga memerlukan pendekatan analisis yang dikombinasikan dengan observasi lapangan.

Aspek desain geometris terbukti memiliki pengaruh signifikan terhadap konsentrasi tegangan. Penelitian oleh [10] menunjukkan bahwa peningkatan radius fillet dari 2 mm menjadi 5 mm mampu menurunkan stress concentration factor (Kt) hingga 18%. Oleh karena itu, optimasi radius transisi dan penyempurnaan permukaan menjadi salah satu strategi utama dalam mencegah kegagalan poros akibat kelelahan maupun beban gabungan [9]. Selain aspek geometris, pemilihan material dan proses perlakuan panas seperti *quenching* dan *tempering* juga berperan penting dalam meningkatkan kekerasan permukaan dan memperpanjang umur pakai poros [11].

Untuk memahami perilaku mekanik poros secara lebih mendalam, berbagai penelitian memanfaatkan metode *Finite Element Analysis* (FEA) sebagai pendekatan numerik. Metode ini memungkinkan evaluasi distribusi tegangan dan deformasi secara detail berdasarkan geometri aktual dan kondisi pembebanan. Perangkat lunak komersial seperti ANSYS, Abaqus, dan SolidWorks Simulation telah banyak digunakan dalam analisis elemen mesin berputar, termasuk poros pompa dan sistem transmisi daya [4], [9]. Namun demikian, sebagian besar penelitian yang ada masih bersifat umum atau berbasis kondisi ideal, sehingga kajian yang secara spesifik mengaitkan desain geometri poros turbin pompa hidrolis dengan kondisi pembebanan aktual di lapangan masih terbatas. Keterbatasan tersebut menunjukkan adanya celah penelitian, khususnya dalam evaluasi kesesuaian desain poros terhadap kondisi operasi nyata yang berpotensi menyebabkan kegagalan. Pendekatan analisis kegagalan berbasis simulasi numerik ini juga menjadi dasar dalam penerapan *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) dan *Root Cause Analysis* (RCA) pada sistem pompa industri modern [12].

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis keamanan desain geometri poros turbin pada sistem pompa hidrolis terhadap distribusi tegangan dan deformasi menggunakan metode Finite Element Analysis (FEA). Penelitian ini menawarkan kebaruan dengan mengintegrasikan pendekatan analisis numerik berbasis FEA dengan data geometri aktual hasil pengukuran lapangan serta observasi langsung terhadap kondisi kerusakan poros. Selain itu, penelitian ini juga mempertimbangkan adanya perubahan kondisi geometris akibat degradasi selama operasi yang berpotensi memengaruhi distribusi tegangan dan kinerja struktural poros, meskipun secara teoritis desain masih berada dalam batas aman. Pendekatan ini memberikan perspektif yang lebih komprehensif dalam mengevaluasi keandalan poros turbin pada kondisi operasi nyata, serta menunjukkan keterbatasan analisis statik dalam memprediksi kegagalan jangka panjang. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran mengenai tingkat keamanan desain poros serta menjadi dasar rekomendasi perbaikan guna meningkatkan keandalan dan keberlanjutan operasi sistem pompa.

METODE

A. Alur Penelitian

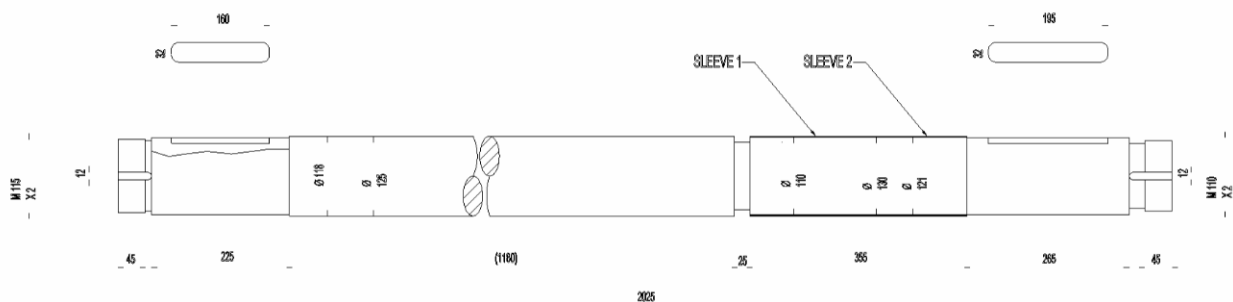
Alur penelitian diawali dengan tahap identifikasi masalah, yaitu mengkaji kegagalan operasional pompa yang terjadi di lapangan dan mengaitkannya dengan dugaan adanya ketidaksesuaian desain poros terhadap kondisi pembebanan aktual. Tahap ini bertujuan untuk menentukan fokus penelitian serta memastikan bahwa permasalahan yang dianalisis relevan dengan aspek desain geometris poros.

Tahap berikutnya adalah pengumpulan data dan observasi lapangan. Pada tahap ini dilakukan dokumentasi kondisi aktual poros turbin pada sistem pompa hidrolis yang mengalami kerusakan, pengukuran dimensi utama poros, serta pengumpulan data pendukung berupa spesifikasi teknis sistem dan hasil analisis material. Observasi difokuskan pada kondisi fisik poros yang mengalami patahan, termasuk adanya indikasi keausan atau pengecilan diameter pada area tertentu. Lokasi tersebut kemudian dikorelasikan dengan posisi pemasangan sleeve berdasarkan data desain dan konfigurasi sistem, meskipun komponen sleeve tidak dapat diamati secara langsung karena hilang saat kejadian operasi. Data yang diperoleh dari lapangan digunakan sebagai dasar dalam proses pemodelan dan analisis numerik seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Data Teknik Turbin

No.	Parameter	Nilai
1.	Jenis turbin	Kaplan (<i>Propeller type</i>)
2.	Konfigurasi poros	Poros vertikal
3.	Beda tinggi (Head)	7,30 m
4.	Debit operasi (Q)	2,46 m³/s
5.	Output daya (N)	210 HP
6.	Putaran normal (n)	250 RPM
7.	Daya Penggerak (Kw)	157,5 Kw
8.	Daya guna (η_t)	87,5%

Berdasarkan hasil pengukuran dimensi aktual dan data observasi lapangan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1, dilakukan pembuatan model tiga dimensi poros pompa menggunakan perangkat lunak SolidWorks. Model yang dibangun merepresentasikan kondisi geometris aktual poros secara menyeluruh, meliputi panjang poros, variasi diameter, fillet radius, serta fitur geometris lain yang berpotensi menjadi lokasi konsentrasi tegangan. Proses pemodelan dilakukan dengan mengacu pada dimensi hasil pengukuran langsung guna meminimalkan deviasi antara model numerik dan kondisi aktual komponen di lapangan. Model tiga dimensi ini selanjutnya digunakan sebagai dasar utama dalam analisis numerik menggunakan metode *Finite Element Analysis* (FEA) untuk mengevaluasi distribusi tegangan dan deformasi akibat pembebanan operasional.



Gambar 1. Dimensi Ukuran Poros Turbin Berdasarkan Data Lapangan

Tahap selanjutnya adalah simulasi dan analisis tegangan menggunakan SolidWorks Simulation dengan pembebanan yang disesuaikan dengan kondisi operasi pompa. Hasil simulasi berupa distribusi tegangan von Mises [13], deformasi, dan konsentrasi tegangan dianalisis serta dibandingkan dengan lokasi kegagalan aktual untuk mengevaluasi kesesuaian pola kerusakan. Hasil simulasi kemudian dianalisis dan dibahas untuk menentukan apakah desain geometris poros berkontribusi terhadap kegagalan operasi pompa. Hasil simulasi digunakan untuk mengevaluasi apakah desain geometris poros secara teoritis memenuhi kriteria kekuatan statik dan bagaimana keterbatasan model tersebut dalam merepresentasikan kondisi operasi aktual.

Tahap akhir penelitian adalah penarikan kesimpulan berdasarkan hasil simulasi dan analisis yang telah dilakukan, serta penyusunan rekomendasi desain atau langkah perbaikan yang bertujuan untuk meningkatkan keandalan poros pompa dan mencegah terulangnya kegagalan serupa.

B. Finite Element Analysis (FEA)

Analisis numerik dalam penelitian ini dilakukan menggunakan metode *Finite Element Analysis* (FEA) melalui aplikasi SolidWorks Simulation. Tahapan FEA diawali dengan pemodelan geometri poros berdasarkan dimensi aktual hasil pengukuran lapangan. Material poros dimodelkan sebagai material homogen dan isotropik dengan sifat mekanik yang diperoleh dari data uji material dan referensi teknis.

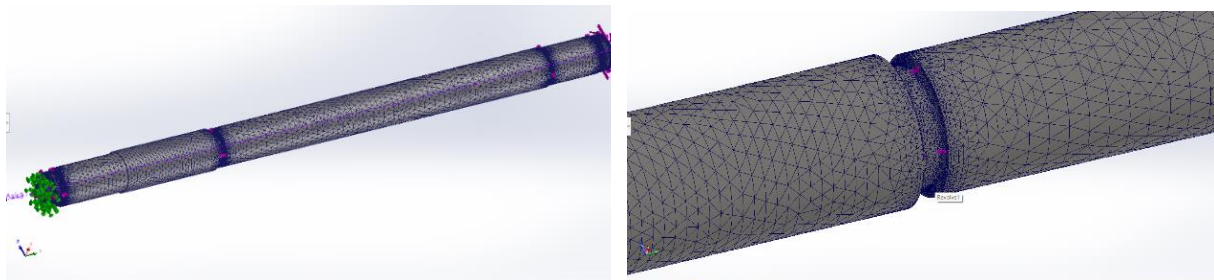
Setelah pemodelan geometri, dilakukan pendefinisian kondisi batas dan pembebanan atau *Set Boundary*. Salah satu ujung poros ditetapkan sebagai tumpuan tetap, sedangkan torsi diberikan pada ujung lainnya sesuai dengan arah dan besar pembebanan operasi. *Boundary Condition* ditetapkan dalam kondisi ideal dengan asumsi tidak terdapat *misalignment*, kontak tambahan, maupun efek dinamis selama operasi. Nilai torsi ditentukan berdasarkan daya keluaran dan kecepatan putaran poros selama kondisi operasi normal. Untuk perhitungan beban torsi yang terjadi pada poros berbentuk silinder dapat dihitung dengan persamaan :

$$\tau = \frac{BHP \cdot 60}{2\pi N}$$

dengan:

- τ = Torsi yang bekerja pada poros (Nm)
- BHP = Brake Horse Power (kW) / Daya penggerak turbin (kW)
- π = Koefisien dari nilai 3,14
- N = Putaran mesin dalam satuan menit (RPM)

Tahap selanjutnya adalah proses diskretisasi atau meshing menggunakan elemen solid tiga dimensi. Penyempurnaan ukuran mesh dilakukan pada area dengan perubahan geometri signifikan, khususnya pada bagian fillet dan transisi diameter, untuk menangkap fenomena konsentrasi tegangan secara lebih akurat. Pada penelitian ini digunakan *curvature-based mesh*, yang dinilai lebih sesuai untuk komponen dengan lengkungan dan radius kecil karena mampu mengikuti kontur geometri secara lebih presisi. Ukuran elemen maksimum ditetapkan sebesar 15 mm, sedangkan ukuran elemen minimum sebesar 3 mm yang diterapkan pada area kritis seperti fillet dan perubahan diameter. Jenis mesh yang digunakan adalah *solid mesh*, sehingga perilaku tegangan dan deformasi volumetrik poros dapat direpresentasikan dengan lebih akurat. Analisis yang dilakukan merupakan analisis statik dengan asumsi perilaku material elastis. Kriteria tegangan *von Mises* digunakan untuk mengevaluasi kondisi keamanan struktur poros turbin karena sesuai untuk material ulet yang bekerja di bawah kombinasi tegangan.



Gambar 2. Meshing/Diskretisasi Pada Model 3D Poros Turbin

Selain evaluasi distribusi tegangan dan deformasi, tingkat keamanan desain poros juga dinilai melalui perhitungan faktor keamanan (*safety factor*). Faktor keamanan ditentukan berdasarkan perbandingan antara tegangan luluh (*yield strength*) material poros terhadap tegangan ekuivalen maksimum *von Mises* yang diperoleh dari hasil simulasi FEA. Pendekatan ini digunakan karena material poros bersifat ulet dan bekerja di bawah kondisi tegangan gabungan, sehingga kriteria *von Mises* dianggap paling representatif untuk mengevaluasi batas aman material. Secara matematis, faktor keamanan dihitung menggunakan persamaan:

$$n = \frac{\sigma_y}{\sigma_{vm,max}}$$

dengan:

- n = Faktor keamanan
- σ_y = Tegangan luluh material poros (Mpa)
- $\sigma_{vm,max}$ = Tegangan *Von Mises Max* (Mpa)

Nilai faktor keamanan kemudian digunakan untuk menilai apakah desain poros telah memenuhi kriteria kekuatan statik. Evaluasi keamanan mengacu pada rekomendasi desain elemen mesin untuk material ulet sebagaimana dijelaskan pada buku [14], yang menyatakan bahwa faktor keamanan minimum untuk poros yang bekerja di bawah pembebanan statik berada pada kisaran 1,5–2,0. Oleh karena itu, dalam penelitian ini desain poros dinyatakan aman secara struktural apabila nilai faktor keamanan berada di atas batas minimum tersebut. Nilai faktor keamanan yang mendekati atau lebih kecil dari satu mengindikasikan kondisi tidak aman dan berpotensi menyebabkan kegagalan struktural.

Tabel 2. Nilai Safety Factor menurut buku [14]

No.	Kondisi Desain Poros	Nilai Safety Factor
1.	Beban statik, Material ulet	1.5 – 2.0
2.	Beban berfluktuasi, ketidakpastian sedang	2.0 – 3.0
3.	Kondisi operasi berat, ketidakpastian tinggi	>3.0

Hasil FEA berupa distribusi tegangan von Mises, perpindahan maksimum, dan regangan ekuivalen dianalisis dan dibandingkan dengan nilai tegangan luluh material serta lokasi kegagalan aktual. Evaluasi ini digunakan untuk menilai apakah desain geometris poros telah memenuhi kriteria kekuatan struktural atau berpotensi menyebabkan kegagalan selama operasi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kegagalan sistem pompa diawali dengan terjadinya gangguan operasional yang ditandai oleh menurunnya kinerja unit pompa dan peningkatan temperatur pada komponen pendukung, khususnya pada area bearing. Kondisi tersebut berkembang hingga pada tanggal 07 Agustus 2024 unit pompa tidak lagi dapat beroperasi secara normal karena poros utama tidak dapat berputar. Berdasarkan hasil pemeriksaan lanjutan yang dilakukan pada 29 November 2024, ditemukan bahwa poros penghubung antara turbin dan pompa mengalami kerusakan berat berupa patahan, sehingga unit pompa dikategorikan sebagai rusak berat dan tidak dapat dioperasikan. Hasil observasi lapangan menunjukkan bahwa lokasi patahan terjadi pada bagian poros yang secara desain berfungsi sebagai area pemasangan sleeve seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Terjadi Pengecilan Ukuran Pada Poros dari Desain yang Seharusnya

Meskipun komponen sleeve tidak dapat diamati secara langsung karena diduga hilang terbawa aliran fluida saat kejadian, kondisi fisik poros pada area patahan memperlihatkan indikasi keausan dan pengecilan diameter sebelum terjadinya patah total. Permukaan poros di sekitar lokasi tersebut menunjukkan karakteristik yang berbeda dibandingkan area lain, yang mengindikasikan adanya *Displacement* dan interaksi mekanis jangka panjang sebelum kegagalan akhir terjadi.

Berdasarkan temuan lapangan tersebut, kerusakan poros tidak hanya dipandang sebagai kegagalan tiba-tiba, melainkan diduga merupakan hasil dari proses degradasi mekanis yang berlangsung dalam jangka waktu panjang selama operasi. Indikasi keausan dan pengecilan diameter pada area pemasangan sleeve menunjukkan adanya interaksi mekanis yang berulang, yang berpotensi memengaruhi distribusi tegangan dan deformasi poros [15]. Oleh karena itu, diperlukan analisis numerik untuk mengevaluasi respons mekanik poros terhadap pembebanan operasional serta menilai apakah desain geometris poros berkontribusi terhadap terjadinya kerusakan.

A. Perhitungan Beban Torsi Operasional

Tahap awal analisis numerik diawali dengan penentuan beban torsi yang bekerja pada poros selama kondisi operasi normal. Data pembebanan diperoleh dari hasil pengumpulan data lapangan dan spesifikasi teknis unit

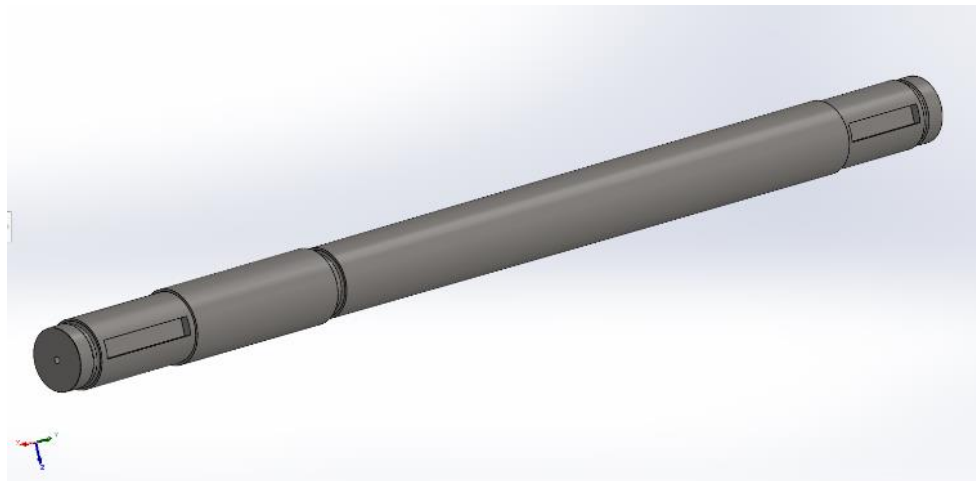
pompa, yang menunjukkan bahwa turbin penggerak menghasilkan daya sebesar BHP = [nilai daya] kW dengan kecepatan putaran poros sebesar N = [nilai putaran] rpm selama operasi normal. Dengan memasukkan nilai daya dan kecepatan putaran poros yang diperoleh dari lapangan, maka torsi operasional yang bekerja pada poros turbin dapat dihitung sebagai berikut:

$$\tau = \frac{157.5 \cdot 60}{2\pi \cdot 250} = 6.016 \text{ Nm}$$

Nilai torsi hasil perhitungan ini selanjutnya digunakan sebagai beban utama pada simulasi Finite Element Analysis (FEA). Pendekatan ini dilakukan untuk memastikan bahwa pembebanan numerik yang diterapkan merepresentasikan kondisi kerja aktual poros selama operasi, sehingga respons tegangan, deformasi, dan faktor keamanan yang diperoleh dari simulasi dapat menggambarkan perilaku mekanik poros secara realistis [16].

B. Permodelan 3D Poros Turbin

Pemodelan geometri poros turbin pada sistem pompa hidrolis dilakukan menggunakan perangkat lunak SolidWorks berdasarkan hasil pengukuran dimensi aktual poros di lapangan. Model tiga dimensi dibangun dengan merepresentasikan seluruh fitur geometris utama poros, meliputi panjang total, variasi diameter, serta radius fillet pada daerah transisi diameter. Area pemasangan sleeve dimodelkan secara detail karena berdasarkan hasil observasi lapangan, lokasi tersebut bertepatan dengan area terjadinya keausan dan patahan poros. Pendekatan ini bertujuan untuk meminimalkan deviasi antara model numerik dan kondisi fisik poros selama operasi. Gambar berikut menunjukkan desain 3D Poros.



Gambar 4. Desain 3D Poros Turbin.

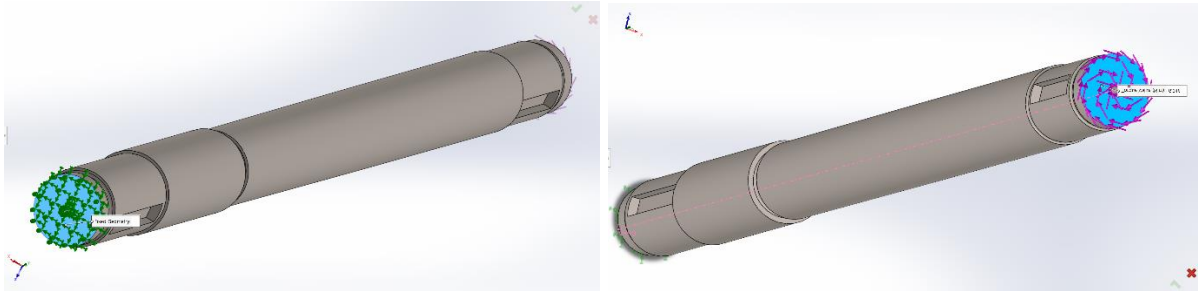
Komponen sleeve tidak dimodelkan secara eksplisit dalam simulasi karena keterbatasan data geometris dan kondisi aktual sleeve yang tidak dapat diamati setelah kejadian kerusakan. Namun demikian, pengaruh keberadaan sleeve dievaluasi secara tidak langsung melalui analisis deformasi (*displacement*) poros pada area pemasangannya.

Setelah melakukan permodelan 3D, langkah selanjutnya adalah memasukan data material berupa *mechanical properties*. Berdasarkan data lapangan, material poros turbin yang digunakan dalam penelitian ini adalah SCM4 (AISI 4140), yaitu baja paduan krom–molibdenum yang umum diaplikasikan pada komponen mesin berputar dan elemen transmisi daya karena memiliki kekuatan mekanik dan ketahanan beban dinamis yang baik [14], [17], [18]. Dalam simulasi numerik, material dimodelkan sebagai material homogen dan isotropik dengan perilaku elastis linear. Ringkasan sifat mekanik material SCM4 yang digunakan dalam penelitian ini disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. *Mechanical Properties* Material SCM 4

No.	<i>Mechanical Properties</i>	<i>Value</i>
1.	Tegangan Luluh (<i>Yield Strength</i>)	620 MPa
2.	Kekuatan Tarik Maksimum (<i>Tensile Strength</i>)	850 MPa
3.	Modulus Elastisitas	210 Gpa

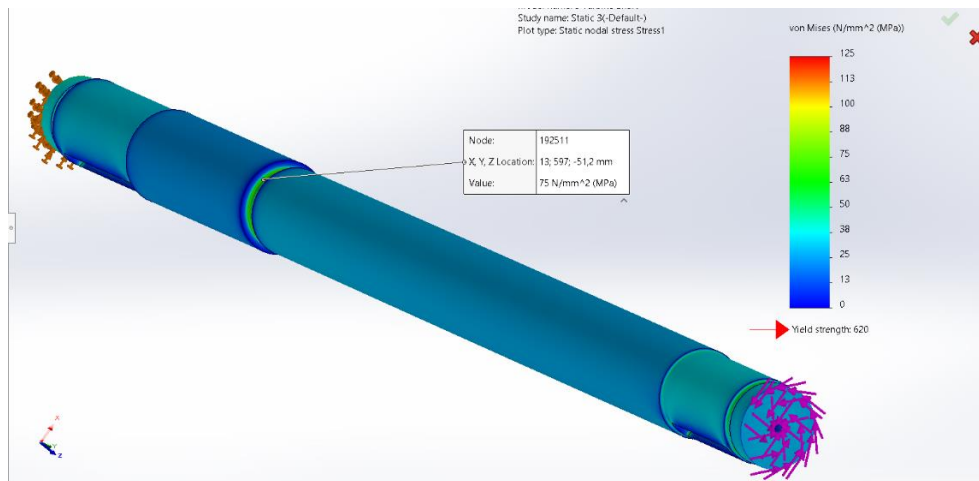
Pada tahap analisis numerik, kondisi batas (boundary condition) ditetapkan untuk merepresentasikan kondisi kerja poros selama operasi seperti yang ditunjukkan pada gambar 5. Salah satu ujung poros dimodelkan sebagai tumpuan tetap (fixed support) yang merepresentasikan posisi poros yang tertahan oleh sistem bearing dan struktur pendukung, sehingga seluruh derajat kebebasan translasi dan rotasi pada ujung tersebut dibatasi. Beban torsi operasional sebesar hasil perhitungan sebelumnya diterapkan pada ujung poros lainnya dengan arah sesuai arah putaran turbin. Pendekatan ini digunakan untuk merepresentasikan kondisi pembebanan utama yang diterima poros selama operasi normal, dengan asumsi bahwa pengaruh beban lentur dan aksial berada di luar ruang lingkup analisis statik pada penelitian ini.



Gambar 5. Boundary Condition yang ditetapkan, Fixed Geometry (kiri), Torque Load (kanan)

C. Hasil Simulasi *Finite Element Analysis* Poros Turbin

Setelah seluruh parameter operasi, material, serta kondisi batas poros ditetapkan sesuai dengan data lapangan, model numerik diselesaikan menggunakan metode Finite Element Analysis (FEA) pada perangkat lunak SolidWorks Simulation. Berikut ini, hasil simulasi yang diperoleh meliputi distribusi tegangan, perpindahan, dan regangan pada poros turbin pompa hidrolis.

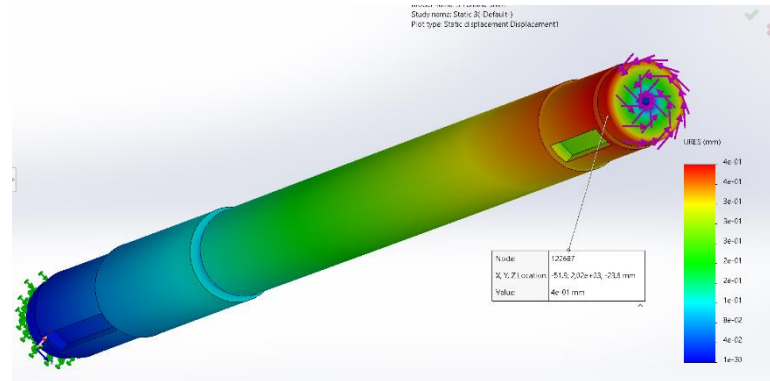


Gambar 6. Hasil *Von Mises Maximum* pada titik patahan poros

Pada gambar 6, nilai tegangan *von Mises* maksimum yang diperoleh sebesar 75 MPa, dengan konsentrasi tegangan utama terlokalisasi pada daerah perubahan geometri poros yang berdekatan dengan area pemasangan sleeve. Pola distribusi tegangan ini menunjukkan bahwa desain geometris poros berkontribusi terhadap terbentuknya konsentrasi tegangan, meskipun nilai tegangannya relatif rendah jika dibandingkan dengan sifat mekanik material poros, yang memiliki nilai tegangan luluh (*yield strength*) sebesar 620 MPa, maka secara kriteria kekuatan statik poros masih berada pada kondisi aman. Dengan nilai $\sigma_{m,max} = 75$ MPa dan tegangan luluh material SCM4 (AISI 4140) sebesar $\sigma_y = 620$ MPa, faktor keamanan statik dihitung sebagai:

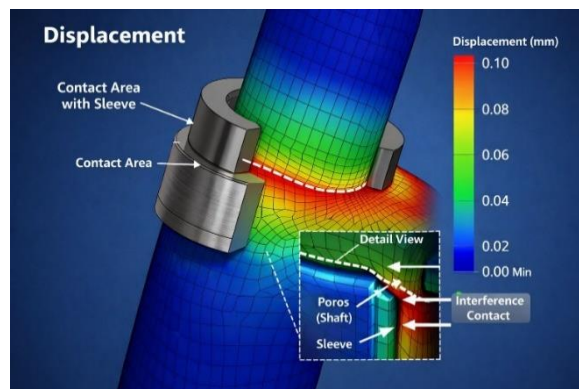
$$n = \frac{620}{75} = 8,27$$

Nilai faktor keamanan sebesar 8,27 menunjukkan bahwa secara teoritis desain poros memiliki margin keamanan yang sangat tinggi terhadap kegagalan akibat beban statik apabila merujuk pada buku [14]. Dengan demikian, nilai faktor keamanan yang diperoleh dari simulasi ini jauh melampaui batas minimum yang disarankan.

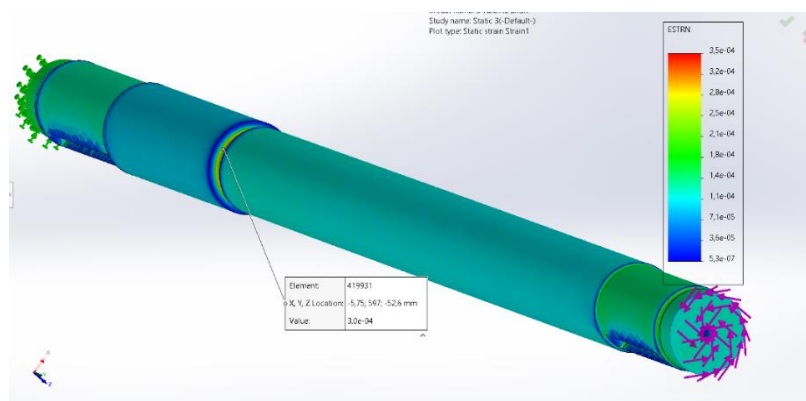


Gambar 7. Hasil *Displacement Maximum* pada bagian sambungan antara Poros Turbin dengan Poros Pompa

Pada gambar 7, analisis menunjukkan *displacement max* = 0,4 mm, terlokalisasi pada bagian atas poros di daerah sambungan *bearing/coupling*. Secara absolut, defleksi ini relatif kecil untuk poros vertikal panjang dan tidak menunjukkan deformasi kritis yang langsung menyebabkan patah pada kondisi geometri nominal. Namun, karena kondisi pemasangan sleeve di lapangan bersifat suaian pas (*interference fit*), setiap defleksi radial atau rotasi berapa pun, berpotensi menimbulkan interaksi kontak lokal dan *micro-motion* pada area pemasangan *sleeve* [4] seperti yang ditunjukkan pada gambar 8. Perlu ditegaskan bahwa FEA statik memberikan gambaran perpindahan global (orde milimeter), sedangkan mekanisme keausan seperti *fretting* dipicu oleh *micro-slip* berulang (orde mikrometer). Oleh karena itu, meskipun nilai 0,4 mm sendiri tidak mengindikasikan kegagalan instan, kombinasi defleksi poros dengan *interference fit* dan operasi jangka panjang (≈ 20.000 jam) menjelaskan kerentanan poros terhadap keausan progresif pada lokasi pemasangan *sleeve*.



Gambar 8. Ilustrasi Mekanisme terjadinya kontak antara Poros Turbin dengan *Sleeve* akibat *Displacement*



Gambar 9. Hasil *Strain Maximum* pada titik patahan poros

Regangan ekuivalen maksimum yang dilaporkan oleh simulasi adalah $\varepsilon_{max} = 2,9 \times 10^{-4}$. Dengan modulus elastisitas $E = 210 \text{ GPa} = 210,000 \text{ MPa}$, tegangan yang berkaitan dengan regangan ini dapat diperkirakan melalui

$$\sigma \approx E\varepsilon_{max}$$

Perhitungannya: $\sigma \approx 210,000 \times 2,9 \times 10^{-4} = 60,9 \text{ MPa}$. Nilai ini berada dalam orde besarnya konsisten dengan hasil Von Mises yang dilaporkan (75 MPa), mengingat Von Mises merepresentasikan tegangan ekuivalen multi-aksial sementara perhitungan $E\varepsilon$ adalah estimasi tegangan linier dari regangan ekuivalen.

D. Interpretasi Hasil dan Mekanisme Kegagalan

Meskipun hasil analisis Finite Element Analysis (FEA) menunjukkan bahwa poros berada dalam kondisi aman terhadap pembebanan statik dengan nilai faktor keamanan yang tinggi, kondisi operasi aktual menunjukkan bahwa poros mengalami pembebanan berulang (*cyclic loading*) selama masa operasinya. Dalam kondisi tersebut, kegagalan material tidak hanya dipengaruhi oleh besarnya tegangan maksimum, tetapi juga oleh akumulasi kerusakan akibat *fatigue*. Tegangan yang berada di bawah batas luluh material tetap dapat menyebabkan inisiasi retakan mikro pada area dengan konsentrasi tegangan tinggi, seperti pada fillet atau daerah perubahan diameter, yang kemudian berkembang secara progresif hingga terjadi patahan [15].

Selain itu, indikasi keausan pada area pemasangan sleeve menunjukkan kemungkinan terjadinya mekanisme *fretting wear* yang dipicu oleh interaksi kontak berulang antara permukaan poros dan *sleeve*. Pada kondisi *interference fit*, adanya pembebanan siklik dan getaran selama operasi dapat menyebabkan micro-slip pada antarmuka kontak, yang merupakan mekanisme utama terjadinya *fretting fatigue* [19]. Berbeda dengan *fatigue* konvensional, fenomena ini melibatkan kondisi tegangan multiaksial pada area kontak yang menghasilkan distribusi tegangan kompleks dan mempercepat inisiasi retakan [19]. Selain itu, pembebanan berulang (*cyclic loading*) pada area kontak juga berkontribusi terhadap akumulasi kerusakan material secara progresif [20]. *Fretting wear* juga diketahui berperan sebagai titik awal inisiasi retakan *fatigue* (*fretting fatigue*), yang secara signifikan menurunkan ketahanan leleh material [2], [15]. Oleh karena itu, kombinasi antara pembebanan siklik dan interaksi kontak menjadi faktor kritis yang dapat menjelaskan terjadinya kegagalan poros, meskipun hasil analisis statik menunjukkan kondisi yang aman secara teoritis.

Secara keseluruhan, hasil FEA menunjukkan bahwa desain poros nominal aman secara statik ($SF \approx 8,27$) dan bahwa tegangan serta regangan berada dalam batas elastik material [14]. Namun, observasi lapangan yang menunjukkan pengecilan diameter dan keausan pada area pemasangan sleeve mengindikasikan bahwa kondisi aktual berbeda dari asumsi geometri nominal yang digunakan dalam model. Penurunan luas penampang akibat keausan meningkatkan tegangan lokal untuk beban torsi yang sama, sehingga kondisi aktual dapat jauh lebih kritis. Selain itu, displacement global yang tercatat (0,4 mm) dapat memperbesar kemungkinan kontak lokal pada kasus suaian pas dan memicu keausan mikro-skala. Perlu dicatat bahwa analisis ini bersifat statik linear, tidak memasukkan pemodelan kontak poros-sleeve (*friction/fretting*), efek dinamis (vibrasi, *misalignment*, *transient*, atau *overspeed*), maupun analisis umur leleh (*Fatigue*), aspek-aspek yang direkomendasikan untuk penelitian lanjutan guna mengkuantifikasi mekanisme degradasi dan prediksi umur pakai pada kondisi operasi nyata [15].

KESIMPULAN

Hasil analisis menunjukkan bahwa poros turbin berada dalam kondisi aman terhadap pembebanan statik, dengan tegangan maksimum sebesar 75 MPa dan faktor keamanan sebesar 8,27, yang masih berada jauh di bawah batas luluh material. Dengan demikian, kegagalan poros tidak disebabkan oleh ketidaksesuaian desain terhadap beban statik.

Sebaliknya, hasil observasi lapangan menunjukkan adanya keausan dan penurunan diameter pada area pemasangan sleeve, yang mengindikasikan terjadinya degradasi mekanis selama operasi. Kondisi ini berpotensi meningkatkan tegangan lokal akibat berkurangnya luas penampang efektif, serta diperparah oleh adanya pembebanan siklik dan interaksi kontak pada kondisi *interference fit*. Kombinasi faktor tersebut mengarah pada kemungkinan terjadinya mekanisme *fatigue* dan *fretting wear* sebagai penyebab utama kegagalan poros.

Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa analisis berbasis FEA statik tidak cukup untuk memprediksi kegagalan poros pada kondisi operasi nyata. Diperlukan pendekatan analisis yang lebih komprehensif, termasuk analisis *fatigue* dan pemodelan kontak, untuk memperoleh evaluasi keandalan dan umur pakai yang lebih akurat.

UCAPAN TERIMA KASIH

Para penulis menyampaikan apresiasi tulus kepada Universitas Widyatama dan Universitas Diponegoro atas dukungan akademis dan fasilitas penelitian. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Unit Wilayah IV Perum Jasa Tirta II atas dukungan teknis dan akses lapangan.

REFERENSI

- [1] R. L. Mott, *Stress and deformation analysis*. 2018. doi: 10.1201/9780367853853-8.
- [2] Mohammad Asaduzzaman Chowdhury, *Lubrication and wear*, vol. 180, no. 4600. 1957. doi: 10.1038/1801448a0.
- [3] D. Ariwibowo, S. Putra, S. Darmanto, J. Mrihardjono, and W. Mangestiyono, "Failure Analysis Of Water Pump Shaft," *J. Vocat. Stud. Appl. Res.*, vol. 1, no. 2, pp. 27–30, 2019, doi: 10.14710/jvsar.v1i2.6301.
- [4] W. Angga Setiawan, "Analisa Kegagalan Poros Pompa Centrifugal Multistage (GA101A) Sub Unit Sintesa Urea PT. Petrokimia Gresik," *Tek. Mesin ITS*, vol. 5, no. 2, pp. 0–5, 2023.
- [5] A. Lubis *et al.*, "Stress Concentration Factors of Stepped-Shafts of Circular-to-Square Cross Section under Twisting Moment," *Jur. Tek. Mesin*, no. November, pp. 21–23, 2007.
- [6] M. H. Henri M Baringbing, "ANALISA KERUSAKAN POMPA VERTIKAL TIPE TAIT MODEL 15BCH-3 DENGAN KAPASITAS 150 L/S DI PDAM TIRTANADI SUNGGAL," no. 2, p. 57, 2013.
- [7] H. Sunandrio and . S., "Analisis Kegagalan Shaft Pompa Submersible Pada Unit Pengeboran Minyak Bumi = Failure Analysis of Pump Shaft Submersible on Oil Drilling Unit," *Mater. Kompon. dan Konstr.*, vol. 14, no. 1, p. 37, 2014, doi: 10.29122/mkk.v14i1.1653.
- [8] S. Hong, "Improvement of lubrication performance in misaligned journal bearings using grooves and rubber under large impact loads," vol. 16, no. 12, pp. 1–16, 2024, doi: 10.1177/16878132241310482.
- [9] R. Alhaffis Firman, Erwen Martianis, Maksun, Ahmad Aidil Rasyid, "Analisis Pengaruh Radius Filler Terhadap Konsentrasi Tegangan Pada Poros Transmisi Baja AISI 1040," *Eng. Sci.*, vol. 11, no. 1, pp. 608–615, 2025.
- [10] W. D. D. F. Pilkey, *Shoulder Fillets*. JOHN WILEY & SONS, INC., 2007. doi: 10.1002/9780470211106.ch3.
- [11] S. R. S. Serope Kalpakjian, *Engineering and Technology*, vol. 7, no. 5–6. 2021. doi: 10.1177/0270467687007005-605.
- [12] Tarumingkeng, "Failure Mode and Effects Analysis," *RUDYCT e-PRESS*, no. November, pp. 1–20, 2024.
- [13] S. P. Collins *et al.*, *AN INTRODUCTION TO PREDICTIVE MAINTENANCE*. Butterworth Heinemann, 2021.
- [14] C. R. Shigley, J. E., & Mischke, *Mechanical Engineering Design*. 2019.
- [15] C.-M. Hou, Nan; Ding, Ning; Qu, Shen; Guo, Weimin; Liu, Long; Xu, Na; Tian, Linan; Xu, Huixia; Chen, Xiangfeng; Zairi, Fahmi; Lawrence Wu, "Failure modes , mechanisms and causes of shafts in mechanical equipment © 2022 . This manuscript version is made available under the CC-BY-NC-ND 4 . 0," *Eng. Fail. Anal.*, 2024.
- [16] A. J. Kailani and I. Nuriskasari, "Analisis Kegagalan Poros High Pressure Circulation Pump 1B2 Dengan Metode Elemen Hingga Abstrak," vol. 4, no. 1, pp. 1051–1061, 2021.
- [17] ANSI/ASME B106.1M, "Design of Transmission Shafting THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS," 1986.
- [18] J. K. N. Richard G. Budynas, *Shigley's Mechanical Engineering Design*, vol. 11. 2012. [Online]. Available: <https://books.google.cl/books?id=eT1DPgAACAAJ>
- [19] J. Zhou, B. Yang, S. Li, and J. Huo, "Fretting Fatigue Life Prediction of Dovetail Structure Based on," 2023.
- [20] Z. Liu, F. Xu, X. Luan, S. Yu, and B. Guo, "The effect of load on the fretting wear behavior of TC4 alloy treated by SMAT in artificial seawater," no. December, pp. 1–12, 2024, doi: 10.3389/fmats.2024.1520286.