

Finite Element Evaluation of Torsional Deformation and Stress Distribution in a Pump-Turbine Shaft System

Rizki Sopandi^{1*}, Adhita Prasetya², Udin Komarudin³

Email corresponding author: rizkisopandi17@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 Juni 2026 | Revised: 20 Juli 2026 | Accepted: 23 Juli 2026

Abstract. *This study evaluates the torsional deformation and stress distribution of a pump-turbine shaft system using the finite element method implemented in SolidWorks Simulation. Unlike previous studies that focused only on the turbine shaft, this research analyzes the mechanical response of the entire shaft system consisting of the thrust bearing shaft, pump shaft, and turbine shaft. The shaft model was developed based on the actual dimensions of the Tarum Barat hydraulic pumping system and analyzed under static torsional loading conditions. The shaft material was SCM4 steel (AISI 4140), assumed to be homogeneous, isotropic, and linearly elastic. A torque of 6016 N-m was applied to represent the operating condition, while boundary conditions were assigned at the bearing support locations. The simulation results indicate a maximum displacement of 0.663 mm, a maximum strain of 0.000993, and a maximum Von Mises stress of 360 MPa, all occurring in the turbine shaft region. The calculated safety factor of 1.72 indicates that the maximum working stress remains below the material yield strength of 620 MPa, confirming that the shaft system operates within the elastic region under the applied loading condition. These findings identify the turbine shaft as the most critical region in the shaft system and provide a basis for design evaluation and preventive maintenance of hydraulic pump shaft systems.*

Keywords - Finite element method; pump-turbine shaft system; torsional deformation; stress concentration; Von Mises stress; SolidWorks Simulation.

Abstrak. *Penelitian ini mengevaluasi deformasi torsional dan distribusi tegangan pada sistem poros pompa-turbin menggunakan metode elemen hingga berbasis SolidWorks Simulation. Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang hanya berfokus pada poros turbin, penelitian ini menganalisis respons mekanik keseluruhan sistem poros yang terdiri atas thrust bearing shaft, pump shaft, dan turbine shaft. Model sistem poros dibuat berdasarkan dimensi aktual pompa hidrolis Tarum Barat dan dianalisis pada kondisi pembebanan torsi statik. Material yang digunakan adalah baja SCM4 (AISI 4140) yang diasumsikan homogen, isotropik, dan elastis linear. Pembebanan diberikan dalam bentuk torsi sebesar 6016 N-m, sedangkan kondisi batas diterapkan pada lokasi bearing support. Hasil simulasi menunjukkan displacement maksimum sebesar 0,663 mm, strain maksimum sebesar 0,000993, dan tegangan Von Mises maksimum sebesar 360 MPa, yang seluruhnya terjadi pada bagian turbine shaft. Nilai Safety Factor sebesar 1,72 menunjukkan bahwa tegangan kerja maksimum masih berada di bawah tegangan luluh (yield strength) material sebesar 620 MPa, sehingga sistem poros masih bekerja pada daerah elastis pada kondisi pembebanan yang dianalisis. Hasil penelitian ini mengidentifikasi turbine shaft sebagai area paling kritis pada sistem poros serta dapat digunakan sebagai dasar dalam evaluasi desain dan penyusunan strategi pemeliharaan preventif untuk meningkatkan keandalan sistem poros pompa hidrolis.*

Kata Kunci - Metode elemen hingga; sistem poros pompa-turbin; deformasi torsional; konsentrasi tegangan; tegangan Von Mises; SolidWorks Simulation.

PENDAHULUAN

Sistem poros turbin merupakan salah satu komponen utama pada sistem pompa hidrolis yang berperan dalam meneruskan putaran dan daya dari motor penggerak menuju bagian turbin dan *impeller*. Selama beroperasi, poros menerima berbagai jenis pembebanan seperti torsi, gaya lentur, dan beban aksial yang bekerja secara terus-menerus sehingga dapat mempengaruhi kestabilan serta kekuatan struktur poros. Pada sistem pompa vertikal, kondisi pembebanan yang tidak seimbang berpotensi menimbulkan gangguan terhadap performa sistem dan memperbesar kemungkinan terjadinya kerusakan mekanis selama operasi berlangsung [1],[2].

Selain harus mampu menahan tegangan mekanis, poros juga dituntut memiliki kekakuan yang baik agar tidak mengalami lendutan berlebih. Defleksi yang terlalu besar dapat menyebabkan terjadinya *misalignment*, meningkatkan

getaran, mempercepat kerusakan *bearing*, dan menurunkan efisiensi kerja sistem secara keseluruhan [2], [3]. Karakteristik vibrasi pada sistem poros bertingkat juga dapat berubah akibat variasi kondisi operasi dan pembebanan yang diterima selama sistem bekerja [4], [5], [6].

Besarnya defleksi dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti dimensi poros, jenis pembebanan, kondisi penumpuan, serta sifat material yang digunakan. Poros dengan bentang yang lebih panjang cenderung memiliki tingkat kekakuan yang lebih rendah sehingga lebih mudah mengalami deformasi akibat kombinasi beban lentur dan torsi [2], [7], [8]. Oleh karena itu, evaluasi terhadap defleksi menjadi salah satu tahapan penting dalam menentukan kelayakan desain sistem poros turbin agar tetap mampu bekerja secara aman dan stabil pada kondisi operasi tertentu [2], [9].

Perkembangan teknologi komputasi saat ini memungkinkan analisis struktur dilakukan menggunakan pendekatan numerik berbasis metode elemen hingga. Metode elemen hingga banyak diterapkan dalam bidang teknik karena mampu memberikan gambaran distribusi tegangan, regangan, dan deformasi secara lebih detail dibandingkan metode analitik konvensional [6], [10]. Selain itu, metode elemen hingga dapat digunakan untuk memprediksi perilaku struktur terhadap variasi pembebanan dan kondisi operasi sehingga hasil analisis menjadi lebih mendekati kondisi aktual [6], [11], [12].

Beberapa penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa metode elemen hingga efektif digunakan dalam analisis sistem poros dan pompa hidrolis. Dong et al. [6] menjelaskan bahwa simulasi numerik mampu digunakan untuk mengevaluasi stabilitas poros pompa sentrifugal serta memprediksi deformasi yang terjadi selama proses operasi. Penelitian lain yang dilakukan oleh Ma et al. [3] menunjukkan bahwa *misalignment* pada poros dapat meningkatkan getaran dan kebisingan sistem sehingga mempengaruhi performa operasional pompa. Selain itu, Bachche dan Tayade [10] menyatakan bahwa metode elemen hingga dapat dimanfaatkan untuk menganalisis distribusi tegangan dan deformasi pada poros pompa sentrifugal sebelum proses manufaktur dilakukan. Penelitian yang dilakukan oleh Altarisi et al. [9] juga menunjukkan bahwa analisis statik berbasis metode elemen hingga mampu mengevaluasi distribusi displacement, tegangan Von Mises, serta faktor keamanan pada poros pompa sehingga dapat digunakan sebagai dasar evaluasi desain dan peningkatan keandalan operasi.

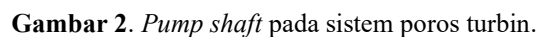
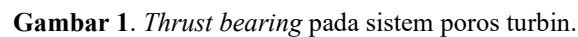
Analisis mengenai perilaku vibrasi dan deformasi poros juga dilakukan oleh Noga et al. [4] yang menunjukkan bahwa pendekatan teoritis dan numerik dapat digunakan untuk menganalisis karakteristik vibrasi pada poros bertingkat. Sementara itu, Sob [13] menjelaskan bahwa simulasi numerik mampu digunakan untuk memprediksi distribusi tegangan dan deformasi pada poros pompa sentrifugal sehingga risiko kegagalan struktur akibat pembebanan berlebih dapat diminimalkan. Penelitian lain juga menyebutkan bahwa evaluasi tegangan dan deformasi menggunakan simulasi numerik dapat membantu meningkatkan efektivitas proses perancangan serta mengurangi potensi kegagalan struktur sebelum tahap produksi dilakukan [6], [9], [14], [15].

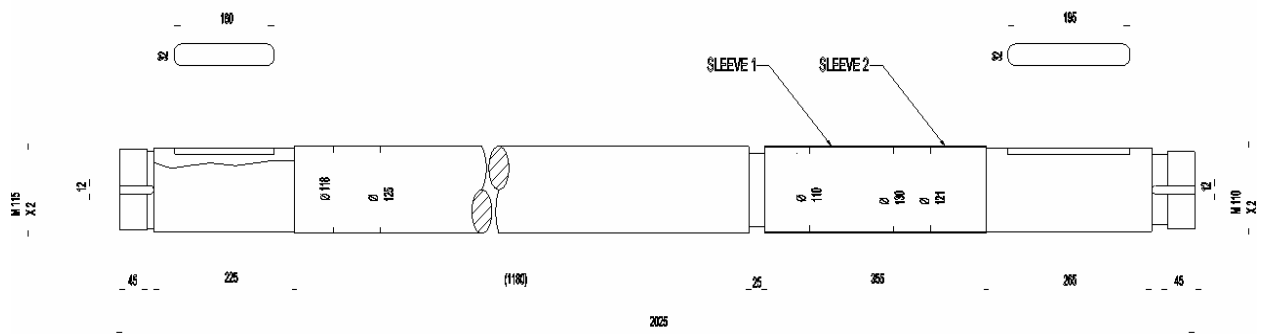
Meskipun berbagai penelitian mengenai analisis sistem poros menggunakan metode elemen hingga telah banyak dilakukan, sebagian besar penelitian masih berfokus pada analisis komponen tertentu, distribusi tegangan lokal, karakteristik vibrasi, maupun fenomena aliran fluida. Pendekatan tersebut belum mampu menggambarkan perilaku mekanik keseluruhan sistem poros sebagai satu kesatuan struktur. Oleh karena itu, evaluasi terhadap keseluruhan sistem poros menjadi penting untuk memperoleh gambaran mengenai tingkat kekakuan dan keamanan struktur secara menyeluruh [2], [7], [8], [9].

Penelitian ini merupakan pengembangan dari penelitian sebelumnya yang telah dilakukan pada sistem pompa hidrolis Tarum Barat. Analisis numerik terhadap aliran fluida dan gaya hidrodinamik turbin Kaplan telah dilakukan oleh Fadilah et al. [16], sedangkan evaluasi beban statik pada *turbine shaft* telah diteliti oleh Muzakki et al. [17]. Meskipun demikian, penelitian tersebut masih berfokus pada evaluasi kondisi statik pada *turbine shaft* sebagai komponen individual dan belum mengevaluasi perilaku mekanik keseluruhan rangkaian sistem poros yang terdiri atas *thrust bearing shaft*, *pump shaft*, dan *turbine shaft* sebagai satu kesatuan struktur. Padahal, pada kondisi operasi aktual ketiga komponen tersebut bekerja secara terintegrasi sehingga deformasi yang terjadi pada satu bagian poros dapat memengaruhi distribusi beban, kekakuan, serta kestabilan sistem poros secara keseluruhan. Akibatnya, informasi mengenai distribusi defleksi, tingkat kekakuan, dan keamanan struktur sistem poros pada kondisi operasi masih belum tersedia secara komprehensif. Kondisi tersebut menyebabkan kelayakan operasi keseluruhan sistem poros belum dapat dievaluasi secara menyeluruh sehingga diperlukan penelitian yang menganalisis sistem poros sebagai satu kesatuan struktur.

Berdasarkan kesenjangan penelitian tersebut, penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi deformasi dan distribusi tegangan pada keseluruhan sistem poros pompa-turbin menggunakan metode elemen hingga berbasis *SolidWorks Simulation*. Analisis dilakukan untuk menentukan nilai *displacement* maksimum, distribusi regangan, tegangan *Von Mises*, serta faktor keamanan akibat pembebanan torsi pada sistem poros. Selain itu, hasil simulasi diverifikasi melalui perhitungan teoritis tegangan geser akibat puntiran untuk memastikan kesesuaian perilaku mekanik struktur. Dengan demikian, penelitian ini bertujuan tidak hanya mengevaluasi distribusi defleksi, regangan, dan tegangan pada sistem poros, tetapi juga menentukan apakah keseluruhan rangkaian poros masih memenuhi kriteria kekakuan dan keamanan struktur sebagai dasar penilaian kelayakan operasi pada kondisi pembebanan yang dianalisis.

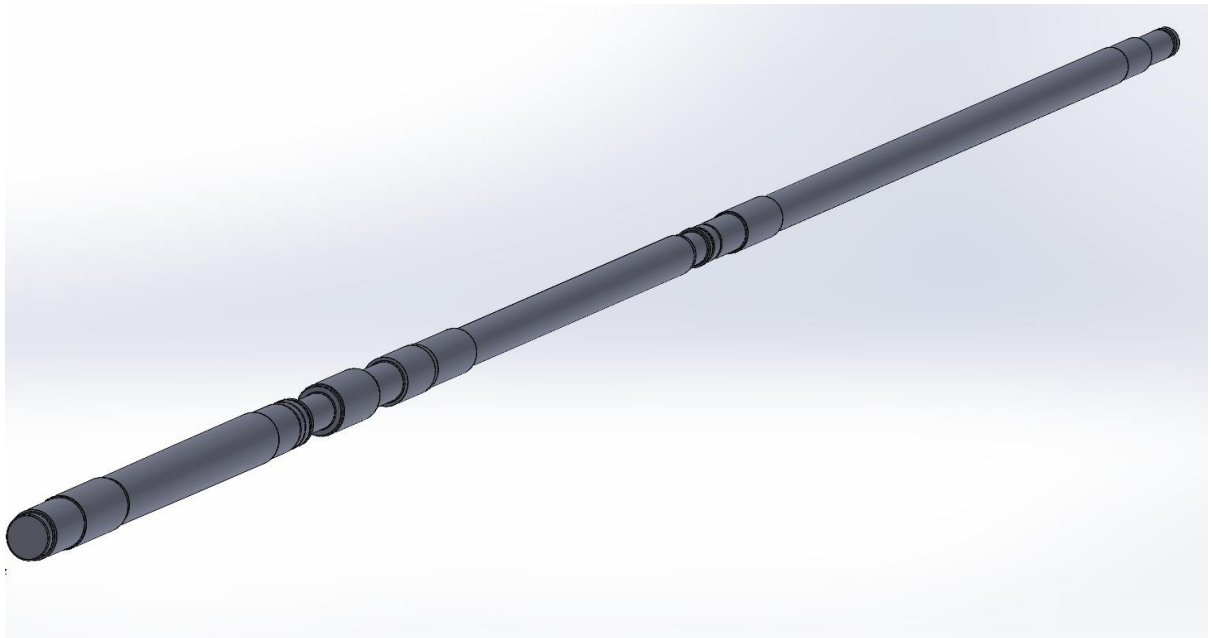
Penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Muzakki et al. [17] berfokus pada analisis statik dan evaluasi kegagalan pada bagian *turbine shaft* menggunakan metode elemen hingga. Selain itu, Fadilah et al. [16] melakukan studi numerik terhadap karakteristik aliran fluida dan gaya hidrodinamik pada turbin Kaplan menggunakan pendekatan *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Kedua penelitian tersebut memberikan gambaran mengenai perilaku struktur dan fluida pada sistem pompa hidroliks Tarum Barat, namun belum mengevaluasi perilaku deformasi keseluruhan rangkaian poros sebagai satu kesatuan sistem. Oleh karena itu, pada penelitian ini analisis diperluas terhadap *turbine shaft*, *pump shaft*, dan *thrust bearing shaft* untuk mengetahui distribusi deformasi serta tingkat kekakuan sistem poros secara menyeluruh menggunakan metode elemen hingga [6], [16], [17].





Gambar 3. Turbine shaft pada sistem poros turbin.

Model poros berikut dibuat berdasarkan dimensi aktual komponen sistem poros turbin yang digunakan pada pompa hidrolis Tarum Barat. Sedangkan pemodelan tiga dimensi dilakukan menggunakan perangkat lunak *SolidWorks* sesuai ukuran dan konfigurasi asli sistem poros.



Gambar 4. Model tiga dimensi sistem poros turbin

Data dan Spesifikasi Material

Data teknis yang digunakan dalam penelitian ini mengacu pada spesifikasi pompa hidrolis Tarum Barat. Sistem yang dianalisis merupakan sistem poros turbin dengan konfigurasi poros vertikal, putaran normal 250 rpm, head 7,30 m, debit operasi 2,46 m³/detik, daya penggerak 157,5 kW, output daya 210 HP, dan efisiensi turbin 87,5%. Data tersebut digunakan sebagai dasar penentuan kondisi kerja poros pada simulasi.

Tabel 1. Data Teknik Sistem Poros Turbin

No	Parameter	Nilai
1	Jenis turbin	Kaplan (<i>Propeller type</i>)
2	Konfigurasi poros	Poros vertikal
3	Head	7,30 m
4	Debit operasi	2,46 m ³ /s
5	Putaran normal	250 rpm
6	Daya penggerak	157,5 kW
7	Efisiensi turbin	87,5%

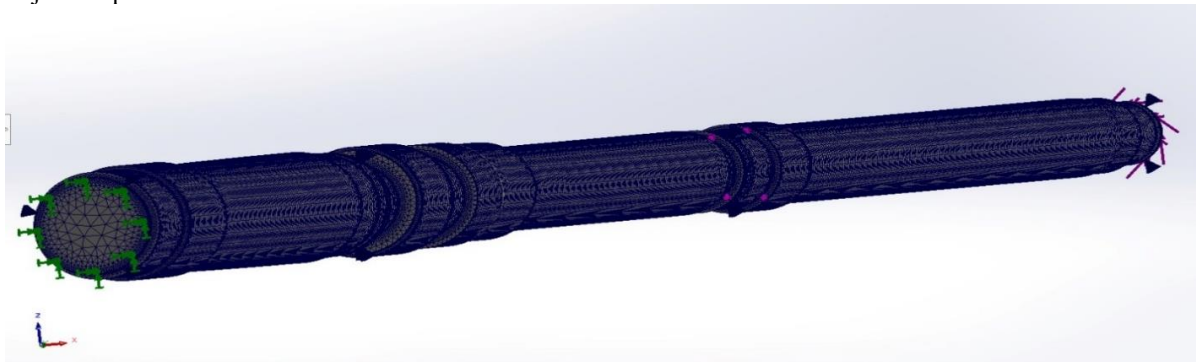
Material poros yang digunakan pada simulasi adalah baja SCM4 yang ekuivalen dengan AISI 4140. Material dimodelkan sebagai material homogen, isotropik, dan elastis linear. Properti mekanik material mengacu pada data komponen aktual serta penelitian yang menggunakan material sejenis [9], [10]. Properti material yang digunakan dalam simulasi ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Properti Material Poros

Parameter	Nilai
Material	SCM4 (AISI 4140)
Modulus Elastisitas	210 GPa
Yield Strength	620 MPa
Tensile Strength	850 MPa
Poisson Ratio	0,29

Mesh Independence

Sebelum dilakukan analisis struktur, model sistem poros terlebih dahulu dibuat *mesh* menggunakan *Solid Mesh*. Proses *meshing* membagi geometri poros menjadi elemen-elemen kecil sehingga distribusi *displacement*, *strain*, dan tegangan dapat dihitung menggunakan metode elemen hingga [6], [11]. Hasil pembentukan *mesh* pada model simulasi ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Hasil proses pembentukan *mesh* pada model sistem poros.

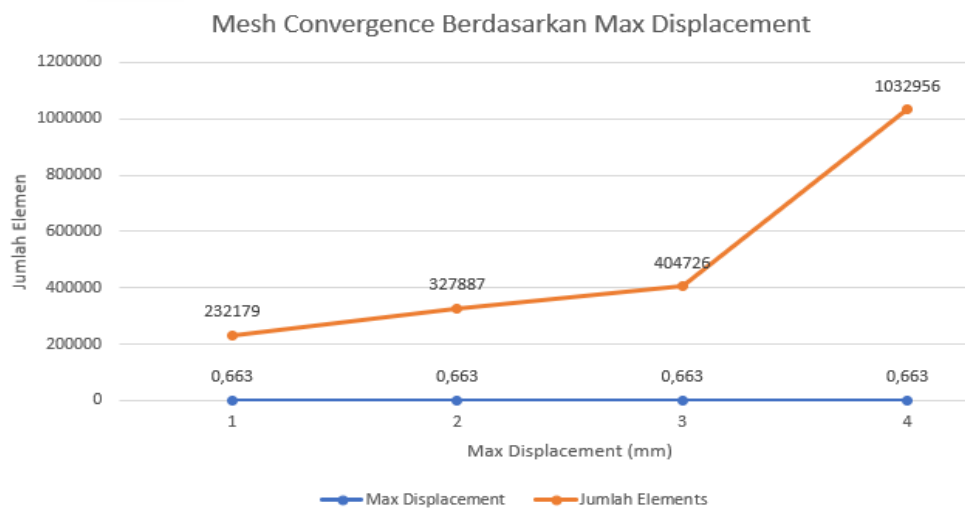
Untuk memastikan bahwa hasil simulasi tidak dipengaruhi oleh ukuran *mesh* yang digunakan, dilakukan *mesh independence test* dengan beberapa variasi nilai *Mesh Refinement* dan *Mesh Size*. Parameter yang diamati meliputi jumlah elemen, *maximum stress*, dan *maximum displacement*. Hasil pengujian disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil *Mesh Independence Test*.

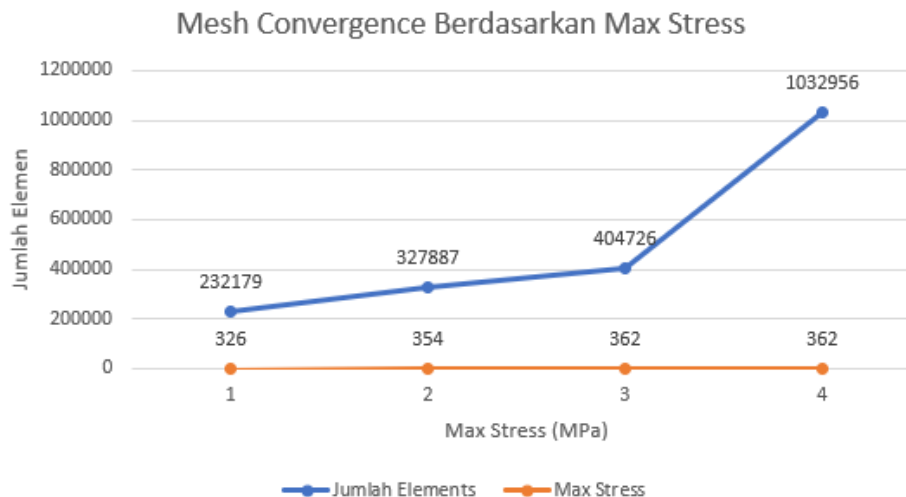
Study	Mesh Refinement	Mesh Size	Jumlah Elemen	Tegangan Maksimum (Mpa)	Displacement Maksimum (mm)
1	50	150	232.179	326	0,663
2	20	100	327.887	354	0,663
3	35	40	404.726	360	0,663
4	5	10	1.032.956	360	0,663

Berdasarkan hasil *mesh independence test* pada Tabel 3, peningkatan jumlah elemen dari 232.179 menjadi 1.032.956 menyebabkan nilai *maximum stress* meningkat dari 326 MPa menjadi 360 MPa, kemudian menunjukkan perubahan yang sangat kecil pada variasi *mesh* berikutnya. Sementara itu, nilai *maximum displacement* tetap sebesar 0,663 mm pada seluruh variasi ukuran *mesh*. Hal tersebut menunjukkan bahwa hasil analisis telah mencapai kondisi konvergen sehingga perubahan ukuran *mesh* tidak lagi memberikan pengaruh yang signifikan terhadap hasil simulasi [6], [9].

Hubungan antara jumlah elemen dengan nilai *maximum displacement* dan *maximum stress* ditunjukkan pada Gambar 6 dan Gambar 7. Grafik *mesh convergence* memperlihatkan bahwa nilai *maximum displacement* telah stabil pada seluruh variasi *mesh*, sedangkan nilai *maximum stress* mengalami peningkatan pada tahap awal sebelum mencapai kondisi yang relatif konstan. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa hasil simulasi telah mencapai kondisi konvergen sehingga ukuran *mesh* yang digunakan tidak lagi memberikan pengaruh yang signifikan terhadap hasil analisis.



Gambar 6. Grafik *Mesh Convergence* berdasarkan *Maximum Displacement*.

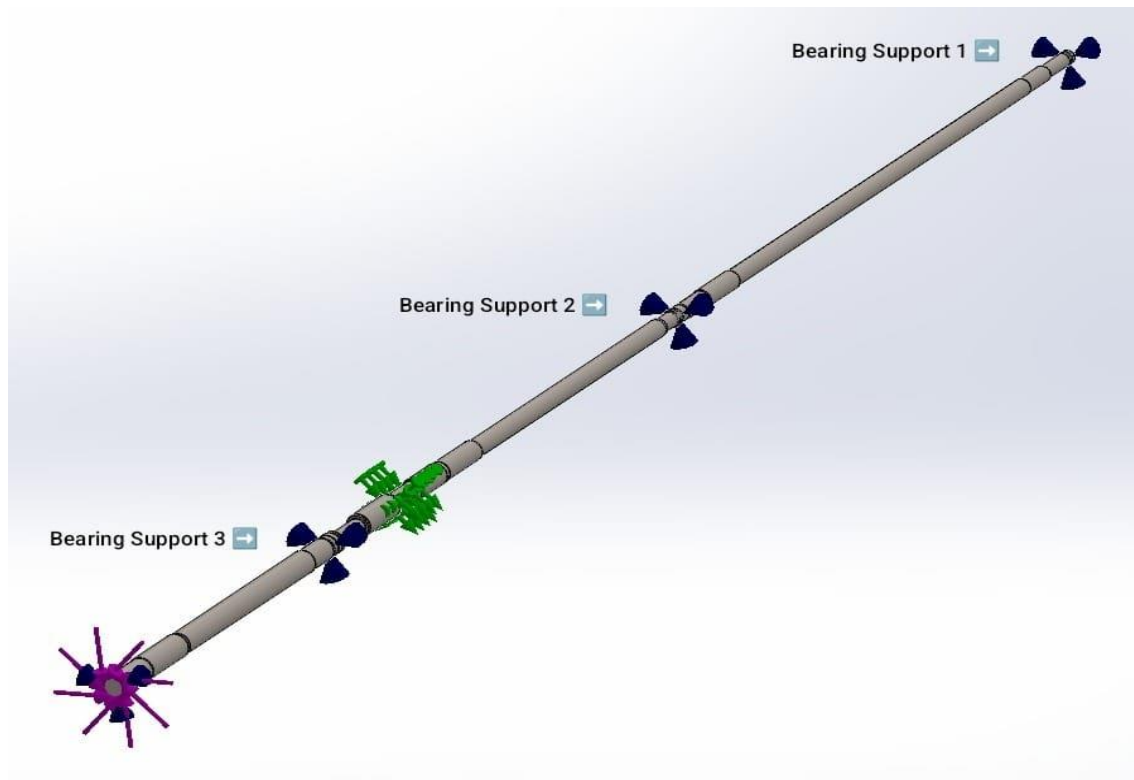


Gambar 7. Grafik *Mesh Convergence* berdasarkan *Maximum Stress*.

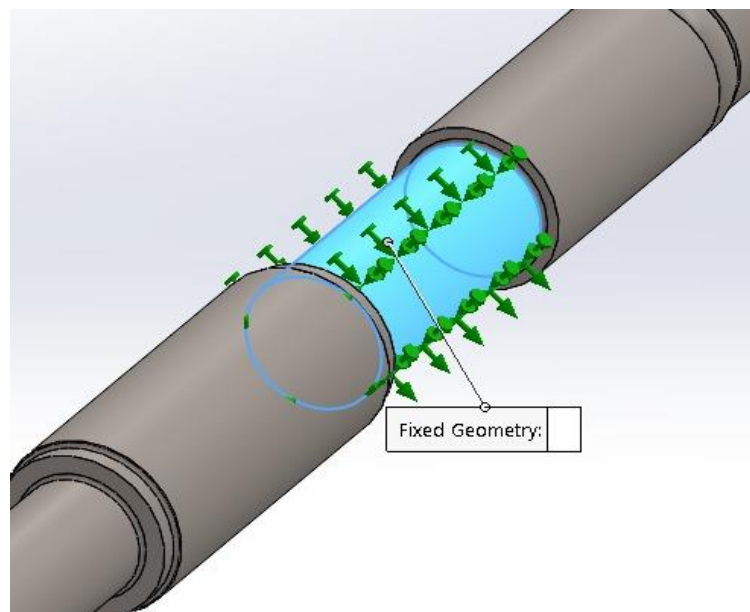
Berdasarkan hasil *mesh independence test*, konfigurasi *mesh* pada *Study 4* dipilih sebagai *mesh* yang digunakan dalam analisis utama karena telah menghasilkan nilai simulasi yang konvergen dengan tingkat ketelitian yang lebih tinggi dibandingkan variasi *mesh* sebelumnya. Dengan demikian, hasil analisis *displacement*, *strain*, tegangan *Von Mises*, dan faktor keamanan pada penelitian ini dapat dianggap telah merepresentasikan respons struktur secara konsisten serta tidak dipengaruhi secara signifikan oleh ukuran *mesh* yang digunakan.

Boundary Condition dan Pembebanan

Boundary condition pada simulasi ditentukan untuk merepresentasikan kondisi operasi sistem poros pompa hidrolis. Kondisi pengekan (*constraint*) diterapkan menggunakan *Fixed Geometry* pada bagian *impeller*, sedangkan *bearing support* digunakan untuk merepresentasikan fungsi bantalan sebagai penumpu poros selama proses transmisi daya [2]. Penerapan *bearing support* dan *Fixed Geometry* pada model simulasi ditunjukkan pada Gambar 8 dan Gambar 9. Dengan kondisi tersebut, sistem poros memperoleh penumpuan yang sesuai dengan kondisi operasional sehingga respons deformasi dan distribusi tegangan akibat pembebanan dapat dianalisis secara lebih representatif.



Gambar 8. Posisi *bearing support* pada sistem poros turbin.



Gambar 9. Penentuan posisi *fixed geometry* pada *impeller*.

Pembebanan diberikan dalam bentuk *torque load* sebesar 6016 N·m pada bagian *turbine shaft*, tepat pada lokasi pemasangan turbin, untuk merepresentasikan momen puntir yang dihasilkan oleh putaran turbin akibat aliran fluida. Posisi pembebanan ditunjukkan pada Gambar 10. Torsi tersebut kemudian diteruskan melalui *turbine shaft*, *pump shaft*, hingga mencapai *impeller*, sehingga distribusi *displacement*, *strain*, tegangan *Von Mises*, dan faktor keamanan pada keseluruhan sistem poros dapat dianalisis menggunakan metode elemen hingga.

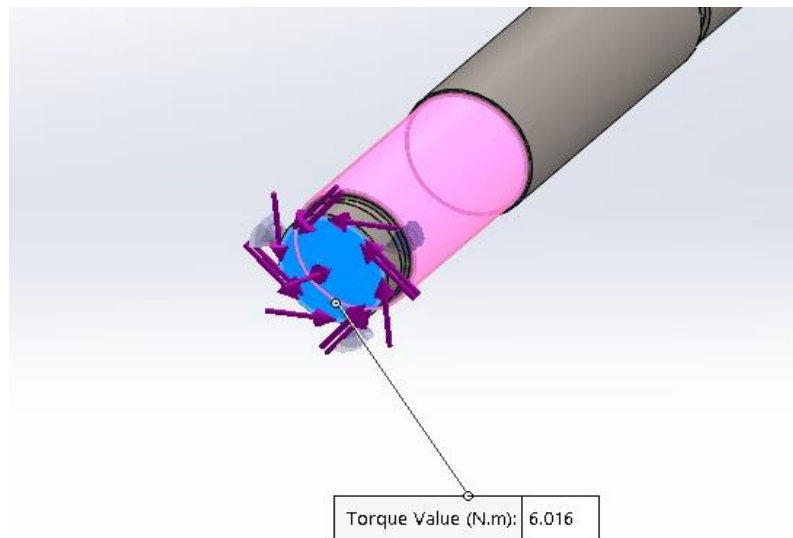
Nilai torsi dihitung berdasarkan daya penggerak dan putaran operasi poros menggunakan Persamaan [7], [8].

$$T = \frac{9550 \times P}{n}$$

$$T = \frac{9550 \times 157,5}{250}$$

$$T = 6016 \text{ N}\cdot\text{m}$$

Dengan T merupakan torsi (N·m), P merupakan daya penggerak (kW), dan n merupakan putaran poros (rpm). Pemberian torsi pada turbin bertujuan untuk merepresentasikan kondisi aktual transfer daya yang bekerja pada sistem poros selama operasi.



Gambar 10. Pemberian *torque load* pada area terpasang nya turbin.

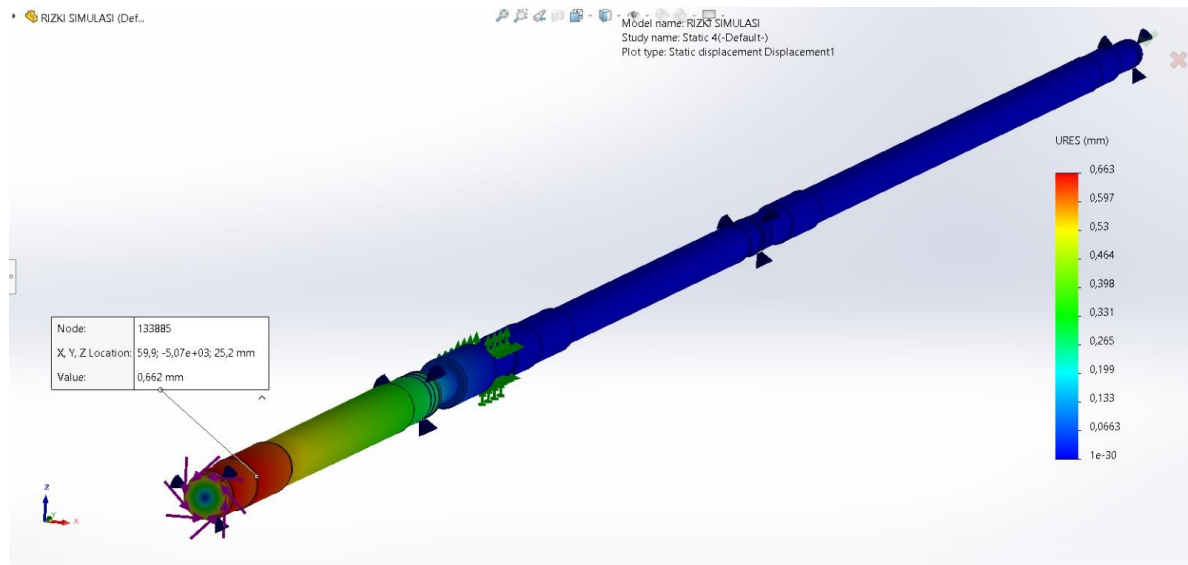
Solver

Analisis numerik dilakukan menggunakan *Static Study* pada perangkat lunak *SolidWorks Simulation* dengan *Solver Type* yang diatur pada mode *Automatic*. Pengaturan ini digunakan agar perangkat lunak secara otomatis memilih metode penyelesaian yang paling sesuai berdasarkan karakteristik model, jenis analisis, konfigurasi *mesh*, dan kondisi pembebanan yang diterapkan. Analisis dilakukan menggunakan pendekatan *linear static* dengan *Solid Mesh* untuk memperoleh distribusi *displacement*, *strain*, tegangan *Von Mises*, dan faktor keamanan pada keseluruhan sistem poros akibat pembebanan torsi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

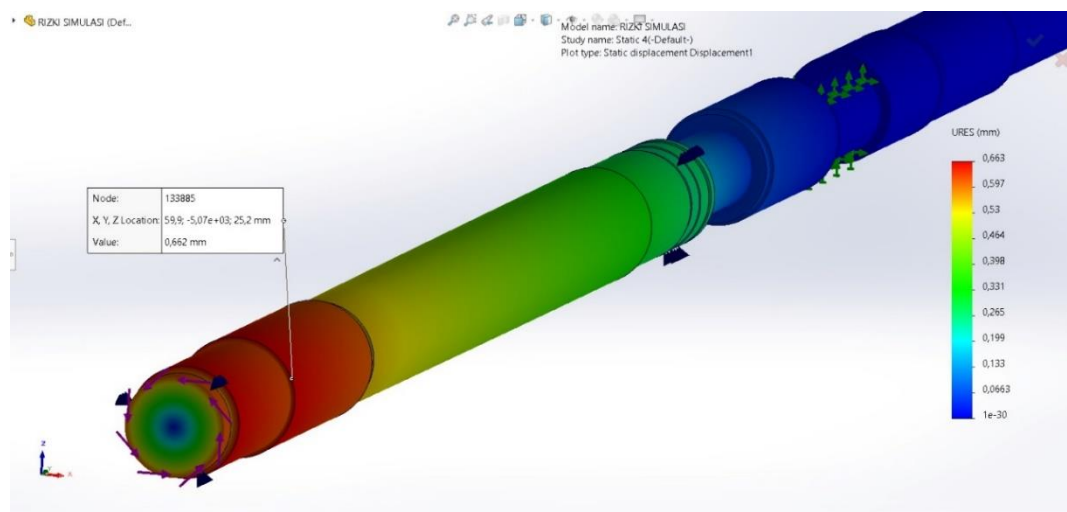
Hasil Displacement

Hasil simulasi menggunakan metode elemen hingga menunjukkan bahwa distribusi *displacement* pada sistem poros tidak terjadi secara merata di sepanjang struktur. Pola deformasi yang terbentuk dipengaruhi oleh konfigurasi penumpuan (*boundary condition*), lokasi pembebanan torsi, serta perubahan geometri pada setiap segmen poros [6], [10]. *Displacement* yang dihasilkan merepresentasikan deformasi torsional yang terjadi selama proses transmisi daya dari *turbine shaft* menuju *pump shaft* hingga *thrust bearing shaft* akibat pembebanan torsi yang diberikan.



Gambar 11. Distribusi *displacement* pada keseluruhan poros turbin

Berdasarkan Gambar 11, distribusi *displacement* menunjukkan peningkatan deformasi dari daerah yang berada di sekitar *fixed geometry* menuju bagian *turbine shaft* yang menerima pembebanan torsi secara langsung. Fenomena tersebut terjadi karena daerah yang mengalami pengekanan memiliki derajat kebebasan (*degree of freedom*) yang terbatas sehingga perpindahan menjadi relatif kecil. Sebaliknya, pada bagian yang menerima pembebanan torsi, poros mengalami deformasi puntir (*torsional deformation*) sehingga nilai *displacement* meningkat seiring dengan bertambahnya jarak dari titik pengekanan. Selain itu, adanya perubahan diameter pada beberapa segmen poros menyebabkan distribusi kekakuan (*stiffness*) tidak seragam, sehingga respons deformasi pada setiap bagian poros juga berbeda. Fenomena ini sesuai dengan teori mekanika material yang menyatakan bahwa deformasi puntir dipengaruhi oleh kekakuan torsi, geometri poros, serta kondisi penumpuan struktur [7], dan sejalan dengan hasil penelitian Bachche dan Tayade [10] serta Muzakki *et al.* [17].



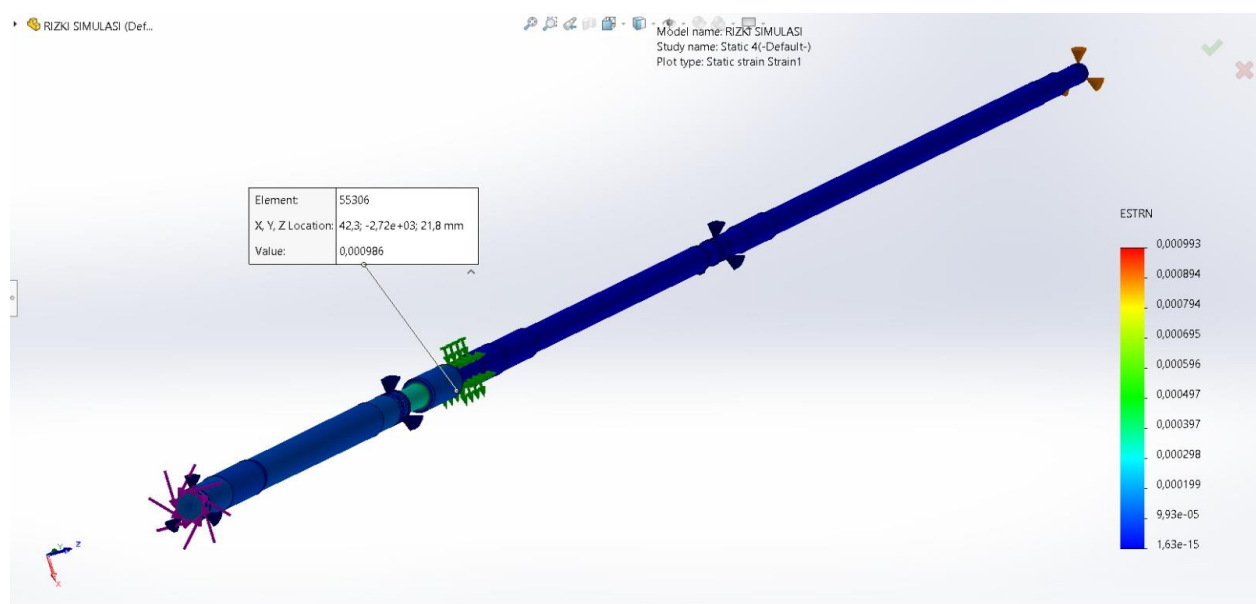
Gambar 12. Hasil *displacement maximum* pada bagian poros yang terpasang turbin.

Berdasarkan Gambar 12, hasil simulasi menunjukkan bahwa nilai *displacement* maksimum sebesar 0,663 mm terjadi pada bagian poros yang terhubung langsung dengan turbin. Lokasi tersebut merupakan titik awal masuknya beban torsi ke dalam sistem sehingga menerima pengaruh pembebanan paling besar dibandingkan bagian poros lainnya. Selama torsi ditransmisikan menuju *pump shaft* dan *thrust bearing shaft*, sebagian deformasi dibatasi oleh keberadaan *bearing support* dan *fixed geometry*, sehingga nilai *displacement* berangsur menurun menuju daerah penumpuan. Kondisi ini menunjukkan bahwa sistem penumpuan berperan dalam meningkatkan kekakuan struktur dan mengendalikan deformasi yang terjadi selama proses transmisi daya.

Secara keseluruhan, hasil analisis displacement menunjukkan bahwa sistem poros memiliki distribusi deformasi yang masih terkendali pada kondisi pembebanan yang dianalisis. Pola deformasi menunjukkan bahwa bagian *turbine shaft* merupakan daerah dengan respons deformasi terbesar akibat pembebanan torsi. Temuan ini konsisten dengan penelitian Muzakki *et al.* [14], yang mengidentifikasi *turbine shaft* sebagai area kritis pada sistem poros serta melaporkan bahwa kegagalan poros pada kondisi operasi aktual terjadi pada lokasi tersebut. Meskipun penelitian ini tidak mengevaluasi mekanisme kegagalan secara langsung, hasil distribusi displacement menunjukkan bahwa area tersebut merupakan bagian yang menerima respons deformasi terbesar. Oleh karena itu, hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai dasar dalam mengidentifikasi area kritis untuk mendukung proses inspeksi, evaluasi desain, serta penyusunan strategi pemeliharaan preventif pada sistem poros pompa hidrolis.

Hasil Strain

Hasil simulasi menggunakan metode elemen hingga menunjukkan bahwa distribusi *strain* pada sistem poros tidak tersebar secara merata di seluruh struktur. Pola distribusi *strain* dipengaruhi oleh lokasi pembebanan torsi, kondisi penumpuan (*boundary condition*), serta geometri poros yang memengaruhi distribusi tegangan internal. Nilai *strain* yang diperoleh merepresentasikan deformasi elastis material akibat pembebanan torsi selama proses transmisi daya pada sistem poros.



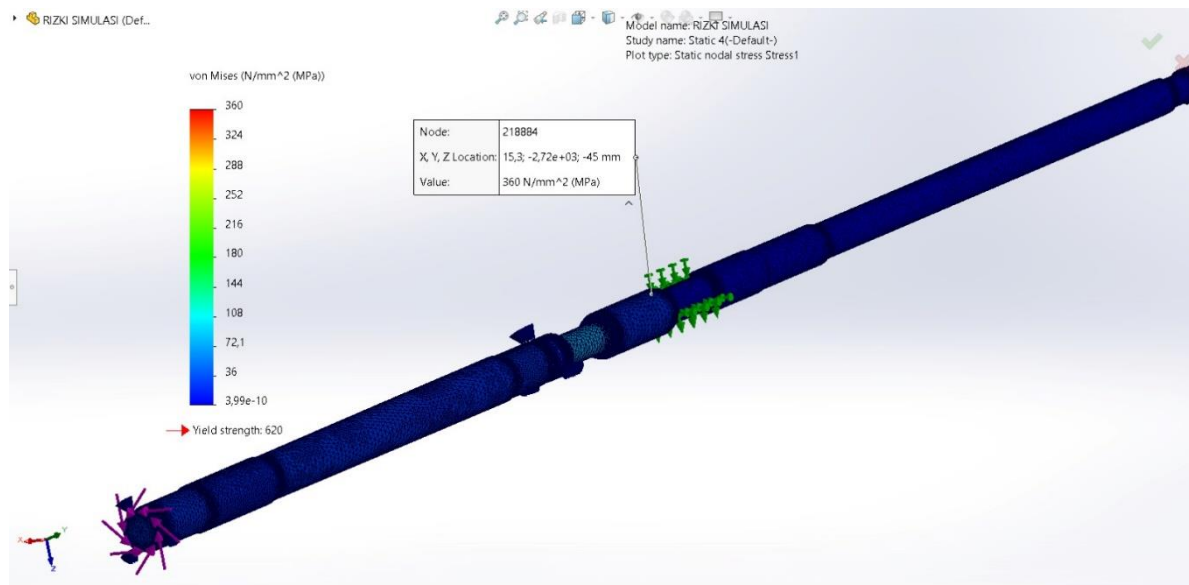
Gambar 13. Distribusi strain pada keseluruhan poros turbin.

Berdasarkan Gambar 13, distribusi *strain* menunjukkan bahwa sebagian besar permukaan poros mengalami regangan yang relatif rendah, sedangkan nilai *strain* tertinggi sebesar 0,000993 terkonsentrasi pada bagian *turbine shaft*. Fenomena ini terjadi karena *turbine shaft* merupakan bagian yang menerima pembebanan torsi secara langsung sehingga mengalami deformasi elastis lebih besar dibandingkan segmen poros lainnya. Selain dipengaruhi oleh lokasi pembebanan, distribusi *strain* juga dipengaruhi oleh variasi geometri dan kekakuan sepanjang poros yang menyebabkan respons deformasi pada setiap segmen berbeda. Sebaliknya, daerah yang berada di sekitar *bearing support* dan *fixed geometry* menunjukkan nilai *strain* yang lebih rendah karena deformasi dibatasi oleh sistem penumpuan sehingga regangan yang terjadi relatif kecil. Fenomena tersebut sesuai dengan teori elastisitas yang menyatakan bahwa regangan dipengaruhi oleh distribusi tegangan, sifat mekanik material, serta kondisi pembebanan yang bekerja pada struktur [7].

Nilai *strain* maksimum sebesar 0,000993 menunjukkan bahwa deformasi yang terjadi masih berada pada daerah elastis material, sehingga material diperkirakan masih mampu kembali ke bentuk semula setelah pembebanan dihilangkan. Kondisi ini mengindikasikan bahwa pembebanan torsi yang diberikan belum menyebabkan deformasi permanen pada sistem poros. Temuan ini juga mendukung hasil analisis *displacement* yang menunjukkan bahwa *turbine shaft* merupakan bagian dengan respons deformasi terbesar akibat pembebanan torsi. Hasil tersebut sejalan dengan penelitian Bachche dan Tayade [9] serta Muzakki *et al.* [14], yang menunjukkan bahwa daerah yang menerima pembebanan terbesar cenderung mengalami regangan elastis lebih tinggi dibandingkan bagian poros lainnya. Oleh karena itu, distribusi *strain* dapat digunakan sebagai dasar untuk mengidentifikasi area kritis yang memerlukan perhatian dalam proses evaluasi desain maupun pemeliharaan sistem poros.

Hasil Tegangan Von Mises

Hasil simulasi menggunakan metode elemen hingga menunjukkan bahwa distribusi tegangan Von Mises pada sistem poros tidak tersebar secara merata di seluruh struktur [7], [10]. Tegangan yang terbentuk dipengaruhi oleh distribusi pembebanan torsi, kondisi penumpuan (*boundary condition*), serta perubahan geometri pada setiap segmen poros. Distribusi tegangan Von Mises digunakan untuk mengevaluasi respons material terhadap kombinasi tegangan yang terjadi selama proses transmisi daya sehingga dapat digunakan sebagai indikator dalam menilai potensi terjadinya luluh (*yielding*) pada material [7].



Gambar 14. Distribusi tegangan *Von Mises* pada keseluruhan sistem poros

Berdasarkan Gambar 14, distribusi tegangan *Von Mises* menunjukkan bahwa sebagian besar permukaan poros mengalami tegangan yang relatif rendah, sedangkan nilai tegangan maksimum sebesar 360 MPa terkonsentrasi pada bagian *turbine shaft*. Fenomena tersebut terjadi karena *turbine shaft* merupakan bagian yang menerima pembebanan torsi secara langsung sehingga menghasilkan respons tegangan yang lebih besar dibandingkan segmen poros lainnya. Selain itu, perubahan geometri pada beberapa bagian poros menyebabkan distribusi kekakuan menjadi tidak seragam sehingga terbentuk konsentrasi tegangan (*stress concentration*) pada area tertentu. Sebaliknya, daerah yang berada di sekitar *bearing support* dan *fixed geometry* menunjukkan nilai tegangan yang lebih rendah karena sistem penumpuan membatasi deformasi dan membantu mendistribusikan beban secara lebih merata. Fenomena ini sesuai dengan teori mekanika material yang menyatakan bahwa distribusi tegangan dipengaruhi oleh kondisi pembebanan, geometri struktur, dan konfigurasi penumpuan [7], serta sejalan dengan hasil penelitian Bachche dan Tayade [10] dan Muzakki *et al.* [17].

Untuk mengevaluasi tingkat keamanan struktur, dilakukan perhitungan *Safety Factor* berdasarkan perbandingan antara *yield strength* material dengan tegangan *Von Mises* maksimum menggunakan Persamaan (3).

$$SF = \frac{\sigma_y}{\sigma_{\max}}$$

$$SF = \frac{620}{360} = 1,72$$

Dengan σ_y merupakan tegangan luluh (*yield strength*) material SCM4 sebesar 620 MPa, sedangkan $\sigma_{\max}$ merupakan tegangan maksimum hasil simulasi.

Nilai *Safety Factor* sebesar 1,72 menunjukkan bahwa tegangan kerja maksimum masih berada di bawah *yield strength* material AISI 4140 sebesar 620 MPa [7]. Dengan demikian, material diperkirakan masih bekerja dalam daerah elastis dan belum mengalami deformasi plastis maupun kegagalan akibat luluh (*yielding*) pada kondisi pembebanan yang dianalisis. Meskipun margin keamanannya lebih kecil dibandingkan hasil simulasi sebelumnya, nilai *Safety Factor* yang lebih besar dari satu menunjukkan bahwa sistem poros masih memenuhi kriteria keamanan terhadap pembebanan torsi pada kondisi operasi yang disimulasikan [7].

Secara keseluruhan, hasil analisis tegangan *Von Mises* menunjukkan bahwa distribusi tegangan pada sistem poros masih berada dalam batas aman terhadap kekuatan material yang digunakan. Bagian *turbine shaft* tetap menjadi area yang menerima respons tegangan terbesar sehingga perlu menjadi perhatian dalam proses evaluasi desain maupun inspeksi berkala. Temuan ini konsisten dengan hasil analisis *displacement* dan *strain* yang juga menunjukkan bahwa *turbine shaft* merupakan area dengan respons mekanik terbesar akibat pembebanan torsi. Selain itu, hasil penelitian ini memperkuat penelitian Muzakki *et al.* [17], yang mengidentifikasi *turbine shaft* sebagai area kritis pada sistem poros. Oleh karena itu, distribusi tegangan *Von Mises* dapat digunakan sebagai dasar dalam mengidentifikasi area kritis, mengevaluasi tingkat keamanan struktur, serta mendukung pengembangan desain dan penyusunan strategi pemeliharaan preventif guna meningkatkan keandalan sistem poros.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis menggunakan metode elemen hingga, distribusi *displacement*, *strain*, dan tegangan *Von Mises* pada sistem poros menunjukkan bahwa respons mekanik tidak tersebar secara merata, melainkan terkonsentrasi pada bagian *turbine shaft* sebagai lokasi yang menerima pembebanan torsi secara langsung. Hasil simulasi menunjukkan nilai *displacement* maksimum sebesar 0,663 mm, nilai *strain* maksimum sebesar 0,000993, dan tegangan *Von Mises* maksimum sebesar 360 MPa. Perhitungan *Safety Factor* menghasilkan nilai 1,72, yang menunjukkan bahwa tegangan kerja masih berada di bawah *yield strength* material AISI 4140 sebesar 620 MPa, sehingga sistem poros masih berada dalam kondisi aman pada pembebanan yang dianalisis.

Penelitian ini memperluas kajian sebelumnya yang hanya berfokus pada *turbine shaft* dengan mengevaluasi respons mekanik pada keseluruhan sistem poros yang terdiri atas *thrust bearing shaft*, *pump shaft*, dan *turbine shaft*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *turbine shaft* merupakan area yang mengalami respons mekanik terbesar sehingga dapat diidentifikasi sebagai area kritis pada sistem poros. Temuan ini diharapkan dapat menjadi dasar dalam proses evaluasi desain, inspeksi, dan penyusunan strategi pemeliharaan preventif guna meningkatkan keandalan sistem poros pompa hidrolis.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Universitas Widyatama atas dukungan akademik serta fasilitas penelitian yang telah diberikan selama proses penelitian berlangsung. Apresiasi juga disampaikan kepada Unit Wilayah IV Perum Jasa Tirta II atas bantuan teknis dan dukungan akses lapangan yang mendukung kelancaran pelaksanaan penelitian ini.

REFERENSI

- [1] D. Ji, W. Lu, L. Xu, and L. Lu, "Comparison of the Hydraulic Performance and Pressure Pulsation Characteristics of Shaft Tubular Pump Device under Multiple Working Conditions," *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 10, no. 6, 2022, doi: 10.3390/jmse10060750.
- [2] D. M. S. El-Gazzar and A. A. Deabs, "Optimizing vertical pump reliability: Investigating main shaft challenges through integrated design and testing strategies," *Water Sci.*, vol. 38, no. 1, pp. 448–459, 2024, doi: 10.1080/23570008.2024.2384318.
- [3] Q. Ma, K. Wang, H. Liu, and Z. Cheng, "Influence of shaft combined misalignment on vibration and noise characteristics in a marine centrifugal pump," *J. Low Freq. Noise Vib. Act. Control*, vol. 41, no. 4, pp. 1286–1306, 2022, doi: 10.1177/14613484221104627.
- [4] S. Noga, E. Rejman, P. Bałon, B. Kielbasa, R. Smusz, and J. Szostak, "Analytical and Numerical Analysis of Injection Pump (Stepped) Shaft Vibrations Using Timoshenko Theory," *Acta Mech. Autom.*, vol. 16, no. 3, pp. 215–224, 2022, doi: 10.2478/ama-2022-0026.
- [5] L. Bai, L. Zhou, X. Jiang, Q. Pang, and D. Ye, "Vibration in a Multistage Centrifugal Pump under Varied Conditions," *Shock Vib.*, vol. 2019, 2019, doi: 10.1155/2019/2057031.
- [6] L. Y. Dong, Z. J. Shuai, T. Yu, J. Jian, Y. Bin Guo, and W. Y. Li, "A multi-field coupling simulation model for the centrifugal pump system," *Mech. Ind.*, vol. 24, 2023, doi: 10.1051/meca/2023002.
- [7] R. G. Budynas and J. K. Nisbett, *Shigley's Mechanical Engineering Design*. 2011.
- [8] S. I. Units, *R.S Khurmi*, vol. 42, no. 3. 1956.
- [9] M. A. Altarisi, R. Rifelino, D. Y. Sari, and W. Afnison, "Static analysis of boiler feed pump shaft in steam power plants: Enhancing durability and operational efficiency," *Innov. Eng.*, vol. 1, no. 2, pp. 73–95, 2024, doi: 10.58712/ie.v1i2.8.
- [10] P. Bachche, "Finite Element Analysis of Shaft of Centrifugal Pump," *IOSR J. Mech. Civ. Eng.*, vol. 7, no. 3, pp. 37–42, 2013, doi: 10.9790/1684-0733742.

- [11] S. S. Rao, *THE FINITE ELEMENT METHOD IN ENGINEERING*, no. December. 2004.
- [12] F. Yang, G. Xu, J. Guo, Z. Li, Y. Luan, and F. Tang, "Transient dynamic stress behavior analysis of the axial flow pump as turbine at part loads," *Alexandria Eng. J.*, vol. 99, no. March, pp. 180–195, 2024, doi: 10.1016/j.aej.2024.05.003.
- [13] P. B. Sob, "Modelling and simulating stress distribution on a centrifugal pump shaft during backpressure," *Int. J. Eng. Res. Technol.*, vol. 13, no. 10, pp. 2943–2954, 2020, doi: 10.37624/IJERT/13.10.2020.2943-2954.
- [14] V. . Bhandari, "Design of Machine Elements 3rd Ed.," 1961. [Online]. Available: <https://cloudflare-ipfs.com/ipfs/bafykbzacedzhdisdt5sdomajmhpirn66fpad2tvbgg6ddxtez6pufkl326zu4?filename=M. F. Spotts - Design of machine elements-Prentice Hall %281961%29.pdf>
- [15] I. A. Ashar *et al.*, "Studi Numerik Pengaruh External Force Terhadap," vol. 9, no. 1, 2025.
- [16] D. M. Fadilah, A. Prasetia, and N. N. Suryaman, "Studi Numerik Aliran Fluida dan Gaya Hidrodinamik pada Turbin Kaplan Menggunakan Computational Fluid Dynamics," vol. 11, no. 1, 2026.
- [17] H. A. Muzakki *et al.*, "Evaluasi Beban Statis Poros Turbin Kaplan Pada Sistem Pompa Hidrolis Menggunakan Metode Finite Element Analysis (FEA)," vol. 11, no. 1, 2026.

Halaman ini sengaja dikosongkan
(This page is intentionally left blank)