

Analisis Tekanan Seal pada Rudder Stock Menggunakan Computational Fluid Dynamics (CFD)

Dedy Wahyudi^{1*}, Ardan Nagra Coutsar², Dian Prasetyawati³, Anastas Rizaly⁴

¹⁻³ Teknik Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Surabaya, Indonesia

⁴ Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Surabaya, Indonesia

Email : ¹dedy.wahyudi@um-surabaya.ac.id, ²dianprasetyawati@um-surabaya.ac.id,
³anastasrizaly@ft.um-surabaya.ac.id

Alamat: Jl. Raya Sutorejo No.59, Dukuh Sutorejo, Kec. Mulyorejo, Surabaya, Jawa Timur
60113

Korespondensi penulis: dedy.wahyudi@um-surabaya.ac.id

Abstract. A ship is a type of floating structure that is specifically designed to move on the surface of sea water. This structure provides the ability for the ship to carry out various functions, from transporting goods, carrying passengers, to carrying out various other maritime operations. The advantage of a ship lies in its ability to move stably and efficiently in the midst of various dynamic marine environmental conditions. The direction of the ship's movement is controlled by the steering system, which is a crucial component in maintaining the smoothness and accuracy of the ship's journey. This steering system consists of various elements, one of which is the Rudder Stock. Rudder Stock has a vital role in the steering system because it functions as a link between the steering and the ship's propulsion system. Inside the Rudder Stock, there is another important component, namely the Seal. The Seal has the main function of withstanding pressure during ship operations, so that it can prevent leaks that can damage the steering system and other mechanical components. To evaluate the performance of the Seal in withstanding pressure, a pressure analysis was carried out using a numerical method based on Computational Fluid Dynamics (CFD) software, namely ANSYS. The results of the study showed that the total working pressure on the Rudder Stock Seal reached 0.766 bar, which is the sum of the maximum hydrostatic pressure of 0.432 bar and the maximum fluid flow pressure of 0.334 bar.

Keywords: Ship, Specification, Numerical, Method

Abstrak. Sebuah kapal adalah jenis struktur terapung yang dirancang khusus untuk bergerak di permukaan air laut. Struktur ini memberikan kemampuan bagi kapal untuk menjalankan berbagai fungsi, mulai dari mengangkut barang, membawa penumpang, hingga melaksanakan berbagai operasi maritim lainnya. Keunggulan sebuah kapal terletak pada kemampuannya untuk bergerak secara stabil dan efisien di tengah berbagai kondisi lingkungan laut yang dinamis. Arah gerak kapal dikendalikan oleh sistem kemudi, yang merupakan komponen krusial dalam menjaga kelancaran dan akurasi perjalanan kapal. Sistem kemudi ini terdiri dari berbagai elemen, salah satunya adalah Rudder Stock. Rudder Stock memiliki peran vital dalam sistem kemudi karena berfungsi sebagai penghubung antara kemudi dan sistem propulsi kapal. Di dalam Rudder Stock, terdapat komponen penting lainnya, yaitu Seal. Seal memiliki fungsi utama untuk menahan tekanan selama operasi kapal, sehingga dapat mencegah kebocoran yang dapat merusak sistem kemudi dan komponen mekanis lainnya. Untuk mengevaluasi kinerja Seal dalam menahan tekanan, dilakukan analisis tekanan menggunakan metode numerik berbasis perangkat lunak Computational Fluid Dynamics (CFD), yaitu ANSYS. Hasil penelitian menunjukkan bahwa total tekanan kerja pada Seal Rudder Stock mencapai 0,766 bar, yang merupakan penjumlahan dari tekanan hidrostatik maksimum sebesar 0,432 bar dan tekanan aliran fluida maksimum sebesar 0,334 bar.

Kata kunci: Kapal, Spesifikasi, Metode, Numerik

1. LATAR BELAKANG

Kapal adalah jenis struktur terapung yang dirancang khusus untuk bergerak di permukaan laut. Struktur ini memungkinkan kapal menjalankan berbagai fungsi, seperti mengangkut barang dan penumpang, serta melakukan operasi maritim lainnya dengan stabilitas dan

efisiensi dalam lingkungan laut. Sebagai kendaraan laut, kapal dilengkapi dengan berbagai sistem yang mendukung operasinya secara efektif, termasuk sistem propulsi, navigasi, dan kemudi. Arah pergerakan kapal bergantung pada sistem kemudi, yang terhubung langsung dengan kemudi (rudder). Sistem kemudi terdiri dari beberapa komponen, salah satunya adalah rudder stock.

Rudder stock merupakan komponen utama dalam sistem kemudi kapal yang menghubungkan bilah kemudi dengan sistem penggerak di ruang kemudi. Komponen ini mentransmisikan gerakan dari sistem kemudi ke bilah kemudi, memungkinkan kapal berbelok ke arah yang diinginkan. Ketika bilah kemudi berputar membentuk sudut tertentu, terjadi perubahan tekanan, kecepatan fluida, dan arah aliran, yang mengakibatkan perubahan arah kapal (Okuda et al., 2023). Rudder stock dirancang untuk menahan beban hidrodinamik yang dihasilkan oleh aliran air selama operasi, sehingga kekuatan dan daya tahan material rudder stock menjadi hal penting untuk menjamin navigasi kapal yang aman dan efektif.

Rudder stock terdiri dari beberapa bagian utama, termasuk top bearing, bottom bearing, dan rudder pintle. Top bearing dan bottom bearing mendukung rudder stock, memastikan komponen ini tetap pada posisinya selama operasi, sedangkan rudder pintle membantu menstabilkan posisi bilah kemudi. Selain itu, rudder stock dilengkapi dengan seal untuk mencegah air laut masuk ke ruang mesin atau sistem kemudi, yang dapat merusak komponen penting lainnya.

Seal pada rudder stock merupakan bagian penting karena mencegah air laut merembes ke dalam sistem kemudi, yang dapat menyebabkan kerusakan serius pada mesin dan komponen mekanis lainnya. Pemeliharaan rutin seal sangat penting untuk mencegah kebocoran akibat tekanan dan memastikan kinerja optimal sistem kemudi (Dong et al., 2023). Saat memilih spesifikasi seal rudder stock, tekanan kerja seal menjadi parameter penting, karena harus mampu menahan tekanan statis dan dinamis. Pada kapal perang yang sedang dibangun saat ini, rudder stock dilengkapi dengan stopper untuk mencegah aliran air langsung mengenai seal yang ada.

Terdapat beberapa metode untuk menentukan spesifikasi seal rudder stock. Penelitian sebelumnya tentang spesifikasi seal rudder stock menyoroti pentingnya faktor-faktor seperti tekanan, suhu, jenis material, dan metode pemasangan. Seal rudder stock berperan penting dalam melindungi sistem kemudi dari kebocoran dan kegagalan operasi. Berdasarkan penelitian (Prasetyo & W.Lb, 2019) dalam artikel tentang aktuator kemudi, pemilihan material

dan desain seal sangat penting untuk mengatasi kebocoran akibat tekanan dan gaya mekanis yang dihasilkan oleh aktuator. Dalam penelitian lanjutan tentang pemeliharaan poros baling-baling, meskipun fokus utama bukan pada seal rudder stock, metode serupa digunakan untuk menentukan spesifikasi seal, termasuk analisis kekuatan material dan kondisi operasi yang dihadapi sistem tersebut.

Penelitian ini mengungkapkan adanya gap penelitian, dimana belum ada analisis yang membahas dampak penggunaan stopper pada rudder stock dalam pemilihan spesifikasi seal. Oleh karena itu, metode computational fluid dynamics (CFD) diperlukan untuk mengkaji efek tekanan (Coutsar & Setyawan, 2019) akibat penggunaan stopper, dengan tujuan menentukan spesifikasi seal rudder stock yang tepat.

2. KAJIAN TEORITIS

Kecepatan Advanced

Kecepatan Advanced (V_a) adalah kecepatan fluida yang bekerja pada cakram baling-baling, dan dihitung menggunakan rumus berikut (Adji, 2005):

$$V_a = (1 - \omega) V_s \quad (1)$$

Dimana:

V_a : Kecepatan maju (kecepatan ke depan) atau kecepatan aliran pada baling-baling

ω : Fraksi ombak, yang bergantung pada desain kapal

V_s : Kecepatan kapal (m/s)

Fraksi Ombak

Nilai fraksi ombak ω dapat dihitung menggunakan persamaan berikut (Molland, 2011):

$$\omega = (0.5 C_b) - 0.05 \quad (2)$$

Dimana:

C_b : Nilai tak berdimensi yang digunakan dalam berbagai analisis kapal. Nilai ini mencerminkan tingkat kekembungan bentuk lambung kapal.

Tekanan Hidrostatik

Perhitungan tekanan hidrostatik berkaitan dengan tekanan yang diberikan oleh fluida pada kedalaman tertentu. Rumus ini menunjukkan bahwa semakin dalam suatu objek terendam dalam fluida, semakin besar tekanan yang diberikan. Rumus umum yang digunakan adalah (Liu et al., 2022):

$$P = \rho g h \quad (3)$$

Dimana:

P : Tekanan Hidrostatik (Pa atau N/m²)

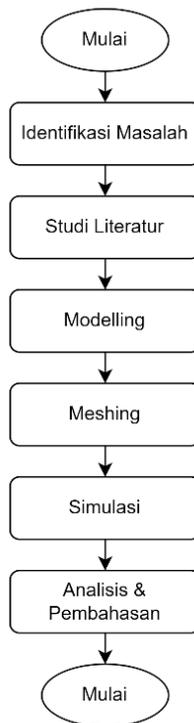
ρ : Massa Jenis Fluida (kg/m³)

g : Percepatan Gravitasi (m/s²)

h : Kedalaman Fluida (m)

3. METODE PENELITIAN

Sebuah diagram alir memberikan gambaran yang jelas tentang setiap langkah yang terlibat dalam proses analisis masalah. Setiap langkah dalam diagram membantu memvisualisasikan aktivitas yang akan dilakukan, mulai dari identifikasi masalah, tinjauan literatur, pembuatan dan simulasi model, hingga evaluasi hasil analisis dan penarikan kesimpulan. Dengan demikian, diagram alir berfungsi sebagai panduan untuk melaksanakan prosedur analisis secara sistematis dan terstruktur, sehingga memudahkan pemahaman dan pelaksanaan setiap tahap yang diperlukan untuk mencapai solusi optimal terhadap masalah yang dihadapi.



Gambar 1 Diagram Alir Penelitian

Pemodelan

Langkah pertama dalam proses ini adalah mengidentifikasi masalah utama yang akan dianalisis, seperti tekanan yang terjadi pada seal. Proses ini mencakup identifikasi sumber masalah, termasuk faktor desain, material, dan kondisi operasi yang dapat memengaruhi kinerja seal. Setelah masalah utama diidentifikasi, langkah berikutnya adalah melakukan tinjauan referensi teoretis dan penelitian terkait. Hal ini bertujuan untuk memahami aspek teknis dan ilmiah yang relevan, seperti prinsip kerja seal, karakteristik material, dan distribusi tekanan pada kondisi operasi tertentu. Tinjauan ini membantu memastikan bahwa analisis didasarkan pada landasan teoretis yang kuat dan mendukung pengembangan solusi yang sesuai. Langkah selanjutnya adalah memilih perangkat lunak yang mendukung CFD (Computational Fluid Dynamics), yaitu ANSYS. Pemodelan 3D juga dapat dilakukan menggunakan perangkat lunak ini.

Pembentukan Mesh

Meshing dalam ANSYS adalah proses membagi domain geometris menjadi elemen-elemen kecil yang disebut mesh atau grid. Elemen-elemen ini digunakan untuk mendiskretisasi model sehingga analisis numerik Computational Fluid Dynamics (CFD) dapat diterapkan. Meshing merupakan langkah krusial dalam simulasi karena memengaruhi akurasi, efisiensi, dan kecepatan komputasi analisis.

Simulasi

Tahapan simulasi dalam analisis tekanan pada seal menggunakan ANSYS melibatkan beberapa langkah utama yang disusun untuk memastikan hasil yang akurat dan relevan. Penjelasan rinci setiap langkah meliputi penentuan gaya eksternal atau tekanan yang bekerja pada seal, seperti tekanan fluida, serta pemilihan sifat material dalam air laut, termasuk densitas dan viskositas.

Visualisasi

Tahap visualisasi dalam ANSYS merupakan bagian dari proses pasca-pemrosesan, di mana hasil simulasi dianalisis dan divisualisasikan untuk memberikan pemahaman yang lebih mendalam tentang distribusi tekanan, deformasi, atau tegangan pada seal kapal.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini berfokus pada simulasi aliran di sekitar rudder stock untuk menganalisis tekanan yang bekerja pada seal rudder. Prosedur penelitian melibatkan pemodelan rudder stock kapal menggunakan perangkat lunak simulasi, di mana geometris rudder stock dan stopper dibuat. Metode yang digunakan untuk menyelesaikan kasus ini adalah numerik dan divalidasi menggunakan perhitungan analitis. Langkah-langkah penerapan metode numerik Computational Fluid Dynamics (CFD) dengan ANSYS meliputi: pertama, pemodelan; kemudian pembentukan mesh; pemrosesan atau perhitungan; dan akhirnya, pasca-pemrosesan atau visualisasi.

Tabel 1 Material Properties Seawater

Parameter	Satuan	Nilai
Massa Jenis	Kg/m ³	1.225
Viskositas	Kg/(ms)	1.789e ⁻⁵

Berikut adalah perhitungan kecepatan advanced V_a dengan kecepatan kapal sebesar 16 knot atau setara dengan 8,23 m/s, dan fraksi ombak ω diasumsikan sebesar 0,093. Hasilnya adalah sebagai berikut :

$$V_a = (1 - \omega) V_s$$

$$V_a = (1 - 0.093) 8.23$$

$$V_a = 7.47 \text{ m/s}$$

Berikut adalah hasil perhitungan tekanan hidrostatik jika diketahui bahwa:

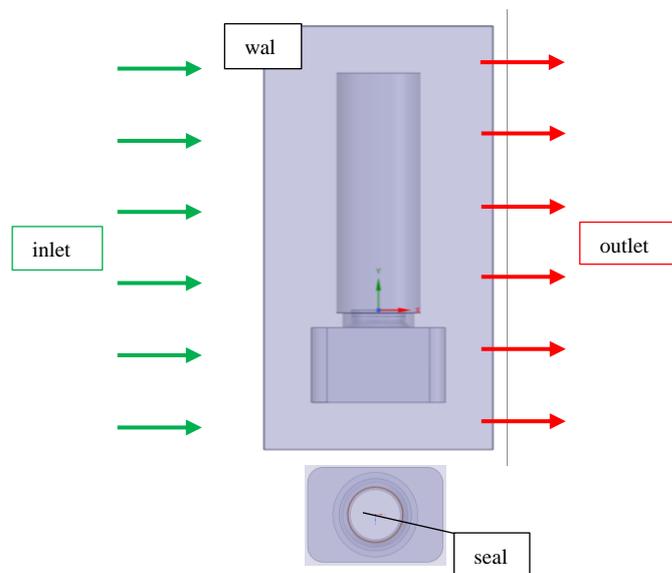
$$P = (1025) (9.81) (4.3)$$

$$P = 43238 \text{ Pa or } 0.432 \text{ bar}$$

Analisis seal pada rudder stock menggunakan perangkat lunak akan menghasilkan nilai yang berfungsi sebagai evaluasi untuk menentukan tingkat tekanan, memastikan bahwa tekanan tersebut tidak memengaruhi kinerja seal pada rudder stock kapal. Model rudder stock ini akan disimulasikan menggunakan perangkat lunak berbasis CFD, dan hasilnya akan digunakan sebagai perbandingan untuk mendapatkan rekomendasi spesifikasi seal yang sesuai untuk rudder stock.

Geometri

Geometri dari rudder stock dan lingkungan sekitarnya merupakan aspek penting dalam simulasi numerik, karena hal ini secara langsung memengaruhi karakteristik aliran dan distribusi tekanan yang memengaruhi kinerja sistem. Model geometri yang terdefinisi dengan baik sangat penting untuk menangkap interaksi antara fluida dan rudder stock dengan akurat.



Gambar 2 Geometri

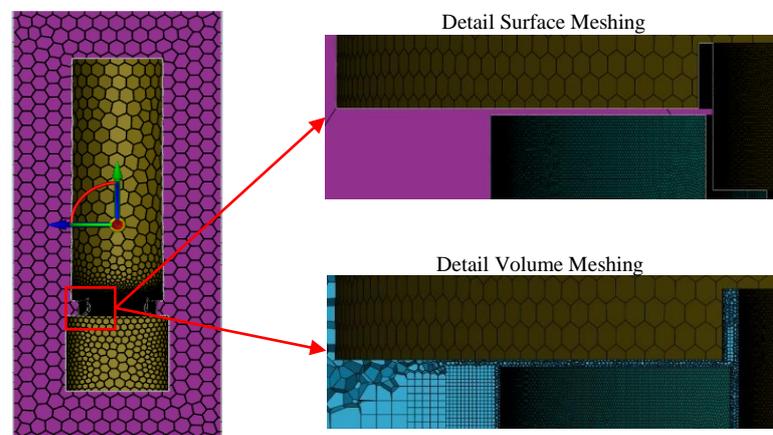
Pada

Gambar 2 di atas, dapat dilihat bahwa fluida mengalir menuju rudder stock, yang ditunjukkan oleh panah hijau. Aliran fluida yang ditunjukkan oleh panah hijau mengenai dinding rudder stock, memberikan tekanan pada dinding dan seal, sementara panah merah menunjukkan aliran fluida yang keluar setelah mengenai dinding rudder stock. Dalam model

yang telah dirancang, langkah berikutnya adalah diskritisasi (meshing), yang bertujuan untuk membagi domain komputasi menjadi sub-volume yang sangat kecil. Proses pemesian di ANSYS tidak dilakukan secara manual tetapi otomatis saat menjalankan simulasi, dan ukuran mesh dapat disesuaikan sesuai kebutuhan. Semakin kecil nilai meshing, semakin rinci analisis komputasi fluida yang dilakukan.

Meshing

Diskritisasi (meshing) adalah langkah penting dalam simulasi numerik, khususnya dalam dinamika fluida komputasional (CFD), karena melibatkan pembagian geometri domain komputasi menjadi elemen atau sel yang lebih kecil dan dapat dikelola. Kualitas dan struktur mesh secara signifikan memengaruhi akurasi dan efisiensi simulasi.



Gambar 3 Meshing

Kondisi Batas

Kondisi batas (boundary conditions) adalah komponen krusial dalam simulasi numerik karena proses ini mendefinisikan bagaimana fluida berinteraksi dengan permukaan dan lingkungan yang mengelilingi objek yang dimodelkan. Menetapkan kondisi batas dengan tepat sangat penting untuk memperoleh hasil simulasi yang akurat dan dapat diandalkan.

Tabel 2 Kondisi Batas

Boundary	Jenis	Nilai	Satuan
Inlet	Velocity Inlet	7.47	m/s
Outlet	Pressure Outlet	0	Pa
Seal	Wall	-	-

Kondisi inlet didefinisikan sebagai inlet kecepatan dengan nilai 7,47 m/s, yang menunjukkan kecepatan fluida yang masuk ke domain simulasi. Ini mencerminkan kondisi

operasional dari rudder stock. Outlet ditentukan sebagai outlet tekanan dengan nilai 0 Pa, yang menetapkan tekanan di outlet menjadi tekanan atmosfer, memungkinkan fluida keluar dari domain tanpa aliran balik. Terakhir, seal diperlakukan sebagai kondisi batas dinding, yang menunjukkan bahwa fluida menempel pada permukaan seal, dengan asumsi kondisi tanpa gesekan (no-slip), di mana kecepatan fluida di dinding adalah nol.

Verifikasi & Validasi

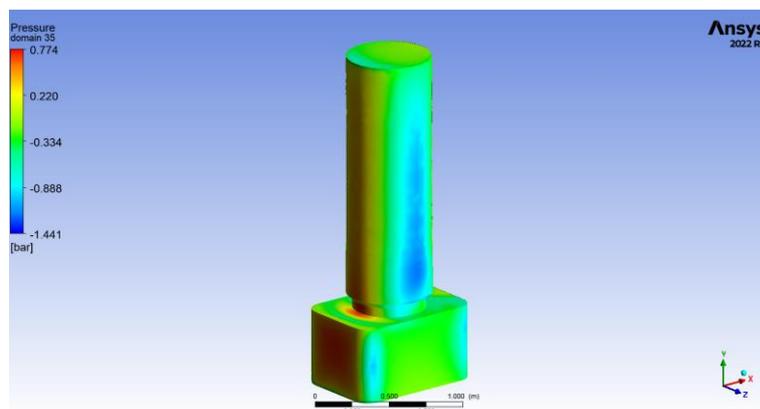
Verifikasi bertujuan untuk memastikan bahwa model, metode, dan implementasi simulasi di ANSYS berjalan dengan benar sesuai dengan persyaratan teknis. Langkah verifikasi bertujuan untuk memastikan bahwa kondisi batas seperti kecepatan fluida inlet dan outlet serta geometri batang kemudi, seal, dan stopper dimodelkan sesuai dengan spesifikasi teknis, memastikan bahwa mesh cukup halus di area kritis seperti sekitar seal dan stopper untuk menghasilkan hasil simulasi yang akurat, serta meninjau distribusi tekanan sepanjang batang kemudi (Stern et al., n.d.).

Validasi dilakukan untuk membandingkan hasil simulasi dengan data eksperimen atau perhitungan analitis untuk memastikan bahwa hasilnya realistis. Dalam studi ini, validasi dilakukan dengan perhitungan analitis pada tekanan hidrostatis berdasarkan kedalaman fluida, perbandingan dengan studi sebelumnya, serta pengujian nilai tekanan maksimum dengan simulasi tekanan pada fluida.

Analisis Tekanan

Tahap berikutnya setelah simulasi adalah fase solusi, dimana hasil simulasi fluida yang diberi tekanan pada rudder stock dapat diamati. Pada fase solusi, model akan diberi kode warna berdasarkan tingkat tekanan yang dialami, mulai dari tekanan maksimum hingga minimum (Scurtu et al., 2018).

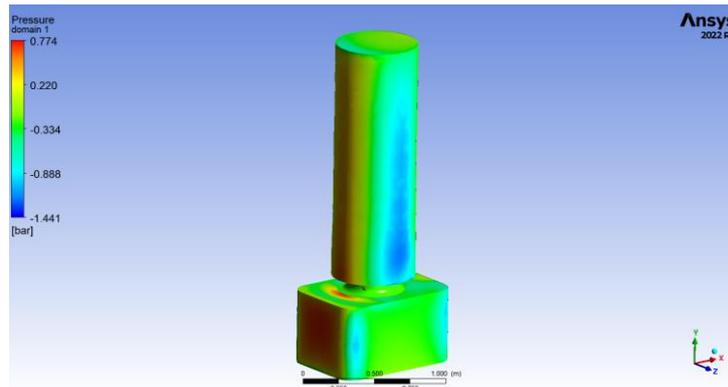
Rudder Stock Dengan Ring Stopper



Gambar 4 Distribusi Tekanan Sepanjang Tongkat Kemudi (Dengan Stopper)

Gambar 4 Tekanan fluida yang terjadi saat kecepatan 16 knot adalah 0,774 bar. Nilai tekanan ini diamati di area cincin pada poros kemudi. Nilai maksimum terjadi di stopper poros kemudi (bukan pada seal poros kemudi).

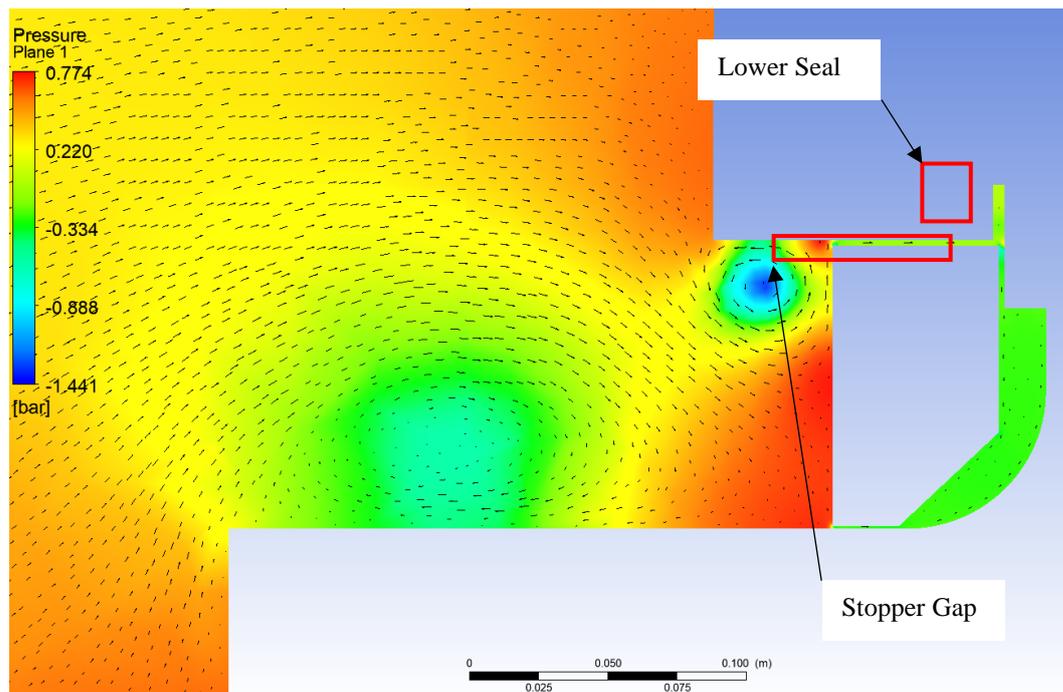
Rudder Stock Tanpa Ring Stopper



Gambar 5 Distribusi Tekanan Sepanjang Tongkat Kemudi (Tanpa Stopper)

Gambar 5 Tekanan fluida yang terjadi pada kecepatan 16 knot adalah -0,3 bar. Nilai tekanan ini diamati di area seal pada tongkat kemudi. Berdasarkan analisis yang dilakukan, ditemukan bahwa tekanan di area seal tongkat kemudi negatif. Hal ini menunjukkan bahwa tekanan di daerah tersebut adalah vakum (Yu-qin & Ze-wen, 2020). Nilai ini dapat berfluktuasi akibat pergerakan fluida. Oleh karena itu, nilai yang diambil adalah nilai absolut.

Karakteristik Fluida di Sekitar Stopper dan Seal Tongkat Kemudi



Gambar 6 Karakteristik Fluida

Di area dalam kotak (seal bawah), tekanan yang diukur adalah sekitar -0,334 bar, yang menunjukkan bahwa terdapat vakum di daerah tersebut. Tekanan negatif ini mengindikasikan bahwa gaya yang bekerja pada fluida di dalam kotak menciptakan lingkungan dengan tekanan lebih rendah dibandingkan dengan area sekitarnya. Kondisi seperti ini dapat mempengaruhi kinerja sistem secara keseluruhan, berpotensi memengaruhi fungsionalitas komponen di sekitarnya dan mengarah pada pertimbangan untuk penyesuaian desain guna menjaga integritas operasional.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan analisis yang dilakukan, disarankan agar tekanan seal berada pada tekanan hidrostatik maksimum sebesar 0,432 bar. Sementara itu, tekanan aliran fluida maksimum yang diamati adalah 0,334 bar. Kesimpulan akhir adalah bahwa total tekanan kerja adalah 0,766 bar, yang diperoleh dengan menambahkan tekanan hidrostatik maksimum dan tekanan aliran fluida maksimum.

DAFTAR REFERENSI

- Adji, S. W. (2005). Engine-propeller matching (pp. 1–31).
- Coutsar, A. N., & Setyawan, D. (2019). Analisis Tegangan Sekat Memanjang Tanker Akibat Beban Sloshing menggunakan Metode Elemen Hingga. In *Jurnal Teknik ITS* (Vol. 8, Issue 1). <https://doi.org/10.12962/j23373539.v8i1.42052>
- Dong, C., Wang, P., Xiang, J., Yang, Z., Yuan, C., Bai, X., & Tian, Y. (2023). Influences of abrasive particles on tribological behaviours of rotary vane steering gear seals under oil. *Wear*, 523, 204815. <https://doi.org/10.1016/J.WEAR.2023.204815>
- Liu, R., Liu, L., & Wang, F. (2022). The role of hydrostatic pressure on the metal corrosion in simulated deep-sea environments — a review. *Journal of Materials Science & Technology*, 112, 230–238. <https://doi.org/10.1016/J.JMST.2021.10.014>
- Molland, A. F. (2011). Ship resistance and propulsion: Practical estimation of ship propulsive power. In *Ship Resistance and Propulsion: Practical Estimation of Ship Propulsive Power* (Vol. 9780521760). <https://doi.org/10.1017/CBO9780511974113>
- Okuda, R., Yasukawa, H., Yamashita, T., & Matsuda, A. (2023). Maneuvering simulations at large drift angles of a ship with a flapped rudder. *Applied Ocean Research*, 135, 103567. <https://doi.org/10.1016/J.APOR.2023.103567>
- Prasetyo, D., & W.Lb, N. A. (2019). ANALISIS KEBOCORAN MINYAK HIDRAULIK STEERING GEAR LPG/C GAS WALIO TERHADAP KESELAMATAN KAPAL SESUAI HAZOP. *Jurnal 7 Samudra*, 4(1). <https://doi.org/10.54992/7SAMUDRA.V4I1.58>
- Scurtu, I. C., Cucu, M., & Sturzu, A. (2018). Mechanical simulation approach in underwater high pressure acting on ships hull. *Journal of Physics: Conference Series*, 1122(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1122/1/012033>
- Stern, F., Wilson, R. V, Coleman, H. W., Paterson, E. G., N---, G., N---, G., & N---, G. (n.d.). *Verification And Validation Of CFD Simulations* (Issue 407).
- Yu-qin, W., & Ze-wen, D. (2020). Influence of blade number on flow-induced noise of centrifugal pump based on CFD/CA. *Vacuum*, 172, 109058. <https://doi.org/10.1016/J.VACUUM.2019.109058>