

ANALISA TEGANGAN DAN DEFORMASI KAPAL PATROLI BERBAHAN MATERIAL HDPE AKIBAT PENGARUH BENDING MOMENT PADA PERAIRAN BERGELOMBANG

Alif Nur Rochmad¹⁾

¹⁾Jurusan Teknik Bangunan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya
E-mail: alif.nur@ppns.ac.id

Abstract

Patrol boats need lightweight yet durable hulls to improve fuel efficiency and operational endurance while withstanding harsh marine environments. High-Density Polyethylene (HDPE) is attractive because of its high strength-to-weight ratio, corrosion resistance, and elasticity. Although investigations have examined the mechanical behaviour of HDPE hulls, most are limited to static loading, focus only on mid-ship sections, or neglect the interaction between realistic hydrodynamic pressures and structural response. Consequently, a clear research gap exists for this research is the lack of an integrated CFD-FEM framework that evaluates the structural performance of a complete HDPE patrol boat under varying wave heights and directions, together with systematic numerical validation. To fill this gap, this study analyzes the structural performance of a patrol boat made from HDPE under bending moments caused by wave-height variations. Numerical simulations using the CFD software coupled with the Finite Element Method determine bending-moment values, stresses, and deformations for wave heights up to 1 m and a head-sea direction of 180°. The highest wave condition yields bending-moment $R_X = -187\,423 \text{ N}\cdot\text{mm}$, $R_Y = -2\,506\,187 \text{ N}\cdot\text{mm}$, a maximum stress of 13.788 MPa, and a deformation of 40.95 mm, all within HDPE's elastic limit. FEM mesh validation shows the smallest error of 16.73 % at a 28 mm mesh size, confirming reliability.

Keywords: *Patrol boat, HDPE, Bending moment, stress, Deformation, CFD Ansys Aqwa, FEM*

PENDAHULUAN

Kapal patroli merupakan salah satu jenis kapal yang memiliki peranan strategis dalam menjaga keamanan wilayah perairan Indonesia yang luas dan kaya sumber daya. Kapal ini digunakan untuk berbagai fungsi, seperti pengawasan wilayah, penegakan hukum kelautan, serta penyelamatan dan bantuan darurat (Kyaw, 2024; Pratama et al., 2023). Oleh karena itu, kapal patroli harus dirancang dengan kokoh, efisien, dan tahan terhadap berbagai kondisi lingkungan terutama di perairan yang penuh gelombang. Dalam konteks ini, pemilihan bahan konstruksi kapal menjadi sangat penting untuk memastikan performa terbaik dari kapal patroli terhadap aspek keamanan, ketahanan, dan efisiensi operasional (B & Suydam, 1952).

Tradisionalnya, kapal banyak dibuat menggunakan bahan kayu akibat ketersediaannya yang melimpah dan kemudahan dalam proses pembuatan. Namun, penggunaan bahan kayu

memiliki banyak kelemahan, termasuk dampak negatif terhadap kelestarian lingkungan karena penebangan hutan yang berlebihan tanpa reboisasi yang memadai. Selain itu, kayu rentan terhadap serangan organisme laut seperti rayap, pelapukan, dan korosi sehingga umur pemakaiannya relatif pendek. Di sisi lain, penggunaan bahan fiber (komposit berbasis serat) juga memunculkan masalah baru yakni terkait kesehatan sebab serat-serat debu yang terlepas selama proses pengolahan dapat menyebabkan iritasi dan gangguan pernapasan bagi pekerja dan pengguna (Li et al., 2022; Ridwan et al., 2022), (Seculi et al., 2022).

Kelebihan material HDPE mulai semakin diakui dalam teknologi pembuatan kapal modern, terutama dalam konteks keberlanjutan dan efisiensi. Kapal yang terbuat dari HDPE memiliki berat yang lebih ringan dibandingkan kayu dan logam, yang berarti konsumsi bahan bakar dapat lebih hemat serta kelincahan kapal di laut meningkat. Selain itu, sifat tahan korosi HDPE mengurangi biaya perawatan dan perbaikan, yang secara ekonomi menguntungkan untuk operasional jangka panjang. Faktor lingkungan juga menjadi pertimbangan utama di era sekarang, dengan HDPE dapat didaur ulang dan penggunaannya tidak menyebabkan kerusakan ekosistem secara signifikan, berbeda dengan kayu yang menimbulkan deforestasi (Manaf et al., 2021), (Rahmaji et al., 2022).

Meskipun sejumlah penelitian telah mengevaluasi perilaku mekanik hull HDPE, sebagian besar terbatas pada beban statis, berfokus pada bagian tengah kapal, atau mengabaikan interaksi antara tekanan hidrodinamik realistik dan respons struktural. Akibatnya, masih terdapat celah penelitian berupa kurangnya kerangka kerja terintegrasi CFD-FEM yang dapat menilai kinerja struktural sebuah kapal patroli HDPE secara menyeluruh pada variasi tinggi dan arah gelombang, serta validasi numerik yang sistematis.

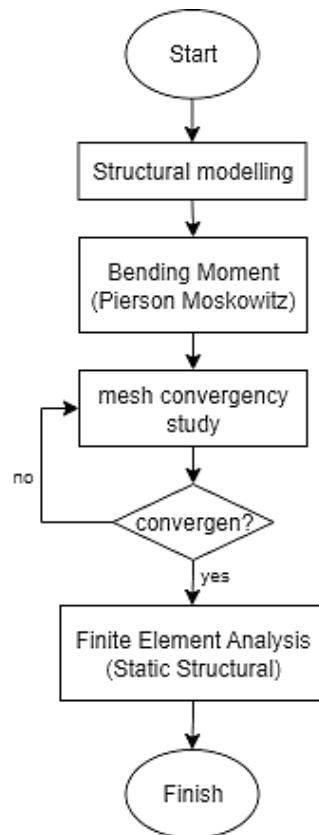
Penelitian ini berfokus pada tiga aspek utama. Pertama, bagaimana besarnya bending moment yang dihasilkan oleh gelombang laut pada hull kapal patroli berbahan High-Density Polyethylene (HDPE) pada berbagai tinggi dan arah gelombang. Kedua, bagaimana distribusi tegangan dan deformasi yang terjadi pada struktur hull akibat bending moment tersebut, terutama pada bagian-bagian kritis seperti mid-ship, bow, dan stern. Ketiga, bagaimana hasil analisis ini dapat dihubungkan dengan batas elastisitas HDPE untuk menilai keamanan struktural serta menentukan parameter-parameter desain yang optimal, seperti ketebalan material, penempatan stiffener, dan faktor keamanan, sehingga potensi risiko kegagalan mekanis dapat dipahami dan diantisipasi dengan baik.

Tujuan utama penelitian ini adalah mengembangkan kerangka kerja simulasi numerik terintegrasi CFD-FEM untuk menghitung bending moment, tegangan, dan deformasi pada

kapal patroli HDPE di bawah kondisi gelombang hingga 1 m dengan arah 180° (head-sea). Selanjutnya, penelitian ini bertujuan menyajikan karakterisasi lengkap respons struktural hull, mengidentifikasi zona-zona kritis, serta membandingkan hasil simulasi dengan batas kuat tarik dan modulus elastis HDPE. Akhirnya, hasilnya akan dirumuskan menjadi rekomendasi teknis—seperti ketebalan hull yang tepat, penempatan stiffener yang optimal, dan faktor keamanan yang sesuai—yang dapat diterapkan dalam perancangan kapal patroli modern yang lebih ringan, kuat, dan tahan terhadap lingkungan laut yang ekstrem. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan memberikan data teknis yang mendukung pengembangan kapal berbahan HDPE yang lebih efisien, aman, dan berkelanjutan. (Bertram, n.d.).

METODE PENELITIAN

Metode penelitian setidak-tidaknya menguraikan pendekatan yang digunakan dalam penelitian, populasi dan sampel penelitian, menjelaskan definisi operasional variabel beserta alat pengukuran data atau cara mengumpulkan data, dan metode analisis data.



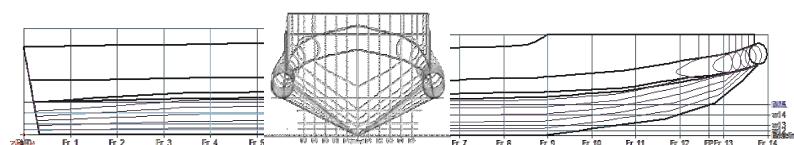
Gambar 1 Flowchart

Tahap awal dalam penelitian ini dimulai dengan pengumpulan data teknis kapal patroli berbahan HDPE (*High Density Polyethylene*) yang meliputi data *linesplan* dan *general arrangement* kapal. *Linesplan* berfungsi sebagai gambaran kerangka utama berupa bentuk lambung kapal yang dilihat dari tampak samping, depan, dan atas. Sedangkan *general arrangement* menggambarkan susunan umum kapal secara komprehensif, termasuk penempatan kulit kapal, frame, serta elemen struktural lainnya. Data ini sangat penting sebagai dasar dalam pemodelan 3D kapal, yang harus merepresentasikan secara akurat kondisi fisiknya. Pengumpulan data dilakukan dengan mengambil gambar teknis dan spesifikasi kapal, dimana ukuran panjang keseluruhan kapal (LOA), lebar, tinggi, draft air laut, dan kecepatan kapal dicatat secara detail. Dengan data tersebut, proses pemodelan dilakukan menggunakan *software CAD* yang sesuai dengan standar perhitungan konstruksi kapal (Rawson & Tupper, 2001).

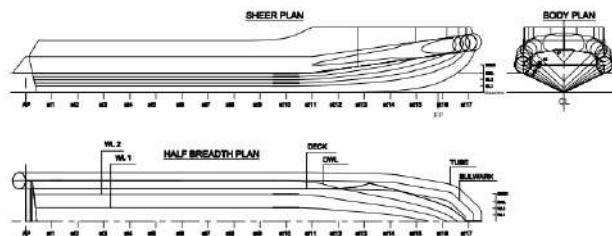
Tabel 1 Ukuran Kapal

Nama	Dimensi	Unit
LOA	7	meter
LPP	6.331	meter
LWL	7	meter
B	1.5	meter
H	0.425	meter
T	0.3	meter
Vs	8	knot

Modelling dilakukan untuk menghasilkan model 3D kapal patroli yang akan digunakan sebagai input simulasi CFD dan FEM. Model ini harus menampilkan bentuk isometri kapal secara realistik sehingga memudahkan peninjauan visual dan validasi terhadap data asli. Dengan model 3D yang valid, proses-proses lanjutan seperti pembuatan mesh dan analisis bendiging moment dari gelombang laut dapat dilakukan dengan presisi yang tinggi. Proses pengumpulan data dan pemodelan kapal ini menjadi fondasi utama dalam rangkaian penelitian, karena keakuratan dan kesesuaian model akan berpengaruh langsung pada hasil simulasi dan analisis struktural (Edward V. Lewis, 1988).

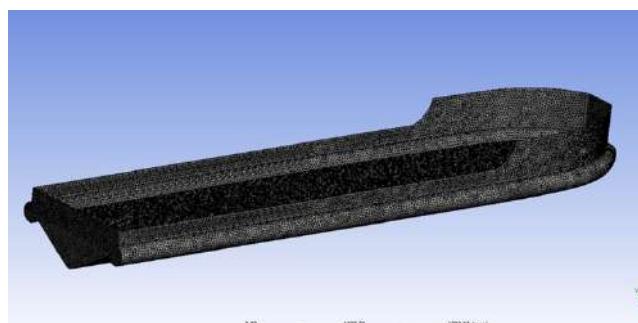


Gambar 2 Linesplan



Gambar 3 General Arrangement

Setelah pemodelan 3D kapal patroli selesai, tahap berikutnya adalah proses *preprocessing* yang meliputi pembuatan mesh pada model menggunakan *software* FEM. Pembuatan mesh merupakan proses pemecahan model kapal menjadi bagian-bagian kecil yang disebut elemen pada *finite element*, yang memungkinkan analisis numerik dilakukan secara terperinci. Pada tahap ini, variasi ukuran mesh diujicobakan mulai dari 25 mm hingga 29 mm untuk memastikan bahwa jumlah elemen dan nodus cukup untuk merepresentasikan struktur kapal secara akurat namun tetap efisien dalam waktu komputasi (*Finite Element Modeling and Simulation with ANSYS Workbench (PDFDrive)*, n.d.).



Gambar 4 Meshing

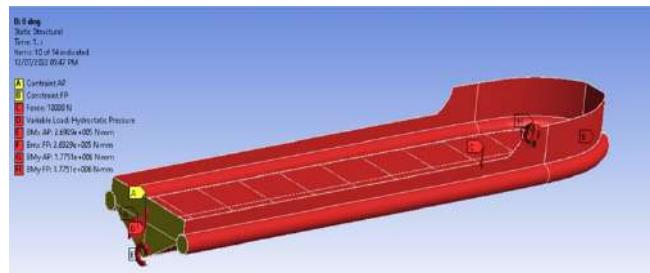
Dalam penelitian ini, ukuran mesh optimal dipilih berdasarkan error relatif terkecil yang didapat, di mana nilai *error* maksimum yang dapat diterima adalah 20% sesuai referensi Patil & Jeyakarthikeyan. Pada model kapal, bagian depan dan belakang diberikan tumpuan dengan pengaturan gerak translasi 0 mm, sedangkan bagian lain diberi translasi bebas pada rotasi. Kondisi ini merepresentasikan restriksi fisik yang dialami kapal saat diuji terhadap beban *bending moment*, dengan beban geladak sebagai gaya eksternal yang bekerja pada struktur kapal.

Tabel 2 Meshing

Element size (mm)	Elements	Nodes
-------------------	----------	-------

29	241351	475418
28	259782	512739
27	291930	577185
26	306581	607156
25	324880	644305

Selanjutnya, validasi model dilakukan melalui uji konvergensi untuk memastikan data yang diperoleh valid dan dapat dipertanggungjawabkan. Bila ditemukan ketidaksesuaian, model dan pengaturan mesh dilakukan revisi sampai kondisi stabil atau konvergen tercapai. Tahap ini sangat menentukan keberhasilan simulasi CFD dan FEM berikutnya, karena keakuratan mesh dan *boundary condition* akan berdampak langsung pada validitas hasil perhitungan bending moment, tegangan, dan deformasi pada kapal.



Gambar 5 Boundary Condition

Pada tahap ini, hasil pemodelan kapal patroli yang telah dibuat dimasukkan ke dalam perangkat lunak CFD untuk melakukan simulasi interaksi kapal dengan gelombang laut. Simulasi CFD bertujuan untuk mengkalkulasi distribusi hidrodinamika, khususnya gaya bending moment yang dialami kapal akibat tekanan gelombang di berbagai titik pada lambung kapal. CFD dipilih karena kemampuannya dalam memodelkan gaya-gaya hidrodinamika dengan akurasi tinggi berdasarkan spektrum gelombang laut yang realistik. Simulasi dimulai dengan pengaturan kondisi gelombang laut menggunakan model spektrum Pierson-Moskowitz, yang merepresentasikan variasi tinggi gelombang mulai dari 0,5 meter hingga 2,0 meter serta arah gelombang yang berbeda (misalnya 0°, 90°, 180°) (Rahmaji et al., 2022). Model spektrum Pierson-Moskowitz menggambarkan distribusi energi gelombang laut

berdasarkan frekuensi sudut ω , dan secara matematis dinyatakan sebagai berikut (Faltinsen, 2005; Lu et al., 2023; Newman, 2017; Seth & Liem, 2019):

$$S(\omega) = \alpha \frac{g^2}{\omega^5} \exp \left(-\beta \left(\frac{g}{\omega U_{19.5}} \right)^4 \right) \quad (1)$$

di mana $S(\omega)$ adalah spektrum energi gelombang (m^2/s), g adalah percepatan gravitasi (m/s^2), ω adalah frekuensi sudut gelombang (rad/s), $U_{19.5}$ adalah kecepatan angin pada ketinggian 19,5 meter (m/s), serta $\alpha=0.0081$ dan $\beta = 0.74$ merupakan parameter empiris. Selanjutnya, tekanan gelombang $p(x,t)$ yang bekerja pada lambung kapal dihitung berdasarkan distribusi energi spektrum ini dan digunakan untuk menentukan bending moment pada kapal. Bending moment pada sumbu longitudinal (RX) dan transversal (RY) dihitung dari integral tekanan gelombang dikalikan dengan momen jarak terhadap titik referensi pada lambung kapal sesuai rumus berikut:

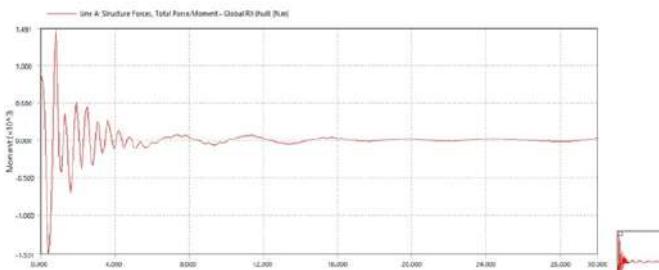
$$M_x = \int_L p(x) \cdot y(x) dx$$

$$M_y = \int_L p(x) \cdot z(x) dx \quad (2)$$

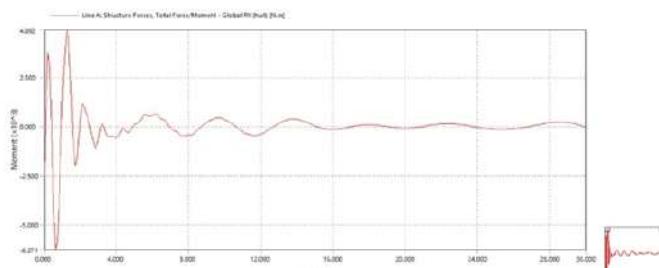
dengan $p(x)$ adalah tekanan pada titik x , $y(x)$ dan $z(x)$ adalah jarak vertikal dan lateral dari titik tersebut terhadap sumbu momen, dan L adalah panjang lambung kapal. Dengan pendekatan ini, CFD Ansys Aqwa mampu mensimulasikan gaya hidrodinamika secara dinamis berdasarkan spektrum gelombang yang realistik, sehingga diperoleh gambaran bending moment yang dialami kapal patrol berbahan HDPE dalam berbagai kondisi gelombang dan arah yang berbeda.

Tabel 3 Grid Konvergensi

Element size (mm)	Elements	Nodes	Stress (Mpa)	Error (%)
29	241351	475418	8.618	-
28	259782	512739	7.176	16.73
27	291930	577185	8.455	17.82
26	306581	607156	5.3237	37.03
25	324880	644305	7.9915	50.11

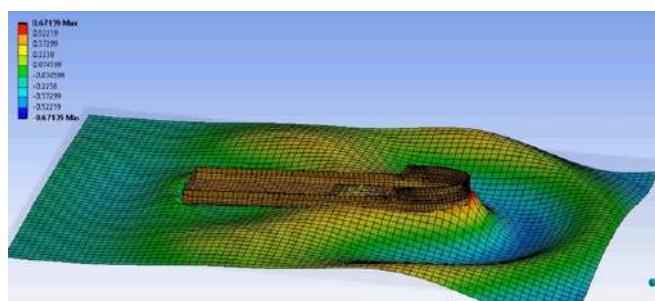


Gambar 6 Bending Moment RX



Gambar 7 Bending Moment RY

Grafik dan tabel hasil bending moment dari simulasi CFD menunjukkan bagaimana besaran gaya lentur ini berubah sesuai variasi tinggi dan arah gelombang, memberikan gambaran komprehensif tentang beban dinamis yang harus ditangani oleh kapal patroli HDPE. Dengan data ini, peneliti bisa mengidentifikasi potensi daerah dengan risiko tinggi terhadap kegagalan material atau deformasi berlebih.



Gambar 8 Simulasi gelombang arah 180 derajat

Setelah nilai bending moment berhasil diperoleh dari simulasi CFD, langkah selanjutnya adalah memasukkan data beban tersebut ke dalam perangkat lunak FEM untuk menganalisis distribusi tegangan dan deformasi pada struktur kapal patroli berbahan HDPE. Tahap ini bertujuan untuk memahami bagaimana struktur kapal merespon beban bending moment di berbagai kondisi gelombang laut yang bervariasi, sehingga dapat diketahui titik-titik kritis yang berpotensi mengalami kegagalan mekanis atau deformasi berlebih. Model FEM yang telah dipersiapkan sebelumnya dengan mesh yang telah terkonvergensi digunakan sebagai basis

analisis. Kondisi batas (*boundary conditions*) diberikan secara tepat, dengan tumpuan pada bagian depan dan belakang kapal untuk membatasi gerak translasi, sementara rotasi dibiarkan bebas agar simulasi menggambarkan kondisi nyata di lapangan. Beban bending moment diaplikasikan pada struktur kapal sesuai hasil simulasi CFD dengan variasi tinggi gelombang mulai dari 0,5 meter hingga 2,0 meter (Fundamentals of Finite Element Analysis, n.d.).

Regangan adalah ukuran perubahan bentuk relatif suatu material dan dapat direpresentasikan dalam bentuk tensor regangan. Untuk regangan kecil, komponen regangan dalam koordinat Cartesian adalah:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

Hubungan antara tegangan dan regangan untuk material elastik linier isotrop diberikan oleh hukum Hooke, dalam bentuk tensor. Untuk keadaan tegangan tiga dimensi, hubungan matriks sering digunakan:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{bmatrix} = \mathbf{D} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Di mana \mathbf{D} adalah matriks kekakuan (constitutive matrix) untuk material isotrop:

$$\mathbf{D} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Hasil simulasi FEM kemudian dianalisis untuk mendapatkan visualisasi distribusi tegangan (stress) dan deformasi pada lambung kapal. Data ini penting untuk mengevaluasi performa material HDPE di bawah beban dinamis dan variatif. Analisis menunjukkan pola distribusi tegangan yang konsisten dan titik deformasi maksimum yang muncul pada area-area tertentu, terutama di sekitar bagian lambung yang mengalami bending moment terbesar.

Tabel 4 Tabel Bending Moment 180 Derajat

180 deg		
H (m)	BM _x (N.mm)	BM _y (N.mm)
0.5	-54381	-1072722

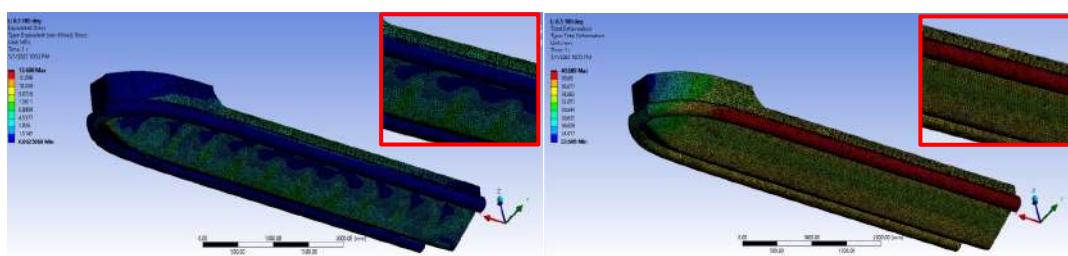
0.75	-127265.2632	-1883636.316
1	-187423	-2506187

HASIL DAN PEMBAHASAN

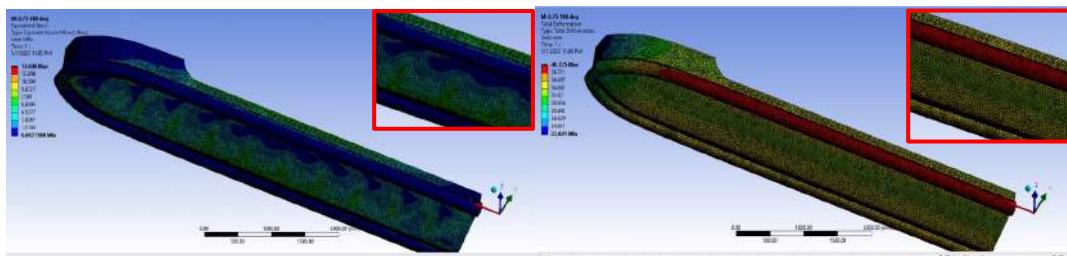
Pada bagian ini dibahas hasil komparatif dari simulasi tegangan yang terjadi pada struktur kapal patroli berbahan HDPE akibat berbagai variasi tinggi gelombang laut. Analisis tegangan menjadi unsur utama untuk menilai kemampuan kapal dalam menahan beban bending moment selama operasional di perairan yang berombak. Dengan menggunakan perangkat lunak FEM berbasis data beban hasil simulasi CFD Ansys Aqwa, nilai tegangan pada struktur kapal diukur dan dianalisis secara rinci.

Simulasi dilakukan pada ketinggian gelombang yang berbeda, yaitu 0,5 meter, 0,75 meter, dan 1 meter, dengan arah gelombang 180 derajat (head sea). Hasil simulasi menunjukkan bahwa nilai tegangan maksimum meningkat seiring kenaikan tinggi gelombang. Pada tinggi gelombang 0,5 meter, tegangan yang terjadi berada pada kisaran 13,6 MPa. Nilai ini meningkat menjadi sekitar 13,7 MPa pada gelombang 0,75 meter, dan mencapai 13,8 MPa pada gelombang tertinggi 1 meter.

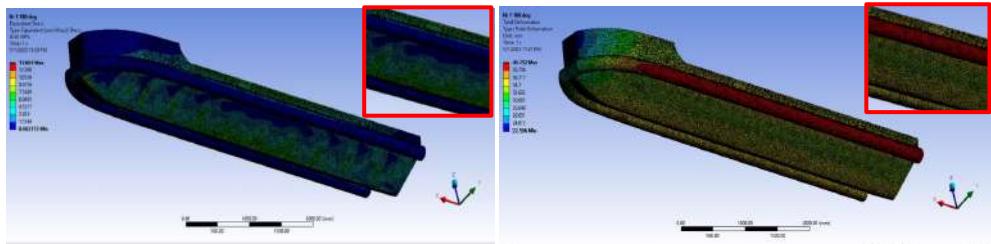
Perbedaan kenaikan tegangan ini mengindikasikan pengaruh langsung variasi tinggi gelombang terhadap gaya lentur yang dialami oleh struktur kapal. Arah gelombang 180 derajat yang langsung menghadang kapal menyebabkan bending moment terbesar dan tegangan tertinggi, sehingga menjadi kondisi kritis untuk evaluasi kekuatan struktur kapal berbahan HDPE. Grafik perbandingan tegangan memperlihatkan tren peningkatan yang linier dengan kenaikan tinggi gelombang, menandakan respons mekanik bahan yang cukup konsisten terhadap beban dinamis tersebut.



Gambar 9 Tegangan dan deformasi pada hs 0.5 m, 180 derajat



Gambar 10 Tegangan dan deformasi pada hs 0,75 m, 180 derajat



Gambar 11 Tegangan dan deformasi pada hs 1 m, 180 derajat

Simulasi regangan dilakukan dengan menggunakan software FEM berdasarkan nilai beban bending moment yang diperoleh dari hasil simulasi CFD Ansys Aqwa pada ketinggian gelombang 0,5 meter, 0,75 meter, dan 1 meter dengan arah gelombang 180 derajat. Data hasil simulasi menunjukkan peningkatan nilai regangan yang konsisten dengan bertambahnya tinggi gelombang. Pada tinggi gelombang 0,5 meter, nilai regangan yang terjadi berada di kisaran tertentu yang masih jauh dari batas regangan elastis material HDPE, menandakan kapal masih memiliki kemampuan deformasi elastis yang cukup baik. Pada gelombang 0,75 meter nilai regangan meningkat secara moderat, namun masih dalam batas aman yang dapat ditangani material tanpa menimbulkan deformasi plastis. Di titik tertinggi 1 meter, nilai regangan mencapai puncaknya, menandakan material HDPE menerima deformasi maksimal dalam kondisi tersebut, namun tetap tidak melebihi batas kritis.

Hasil grafik perbandingan regangan memperlihatkan tren yang hampir linier terhadap kenaikan tinggi gelombang, hal ini mengindikasikan karakter elastisitas HDPE yang stabil terhadap beban lentur dinamis. Visualisasi distribusi regangan pada model kapal juga memperlihatkan titik-titik konsentrasi deformasi yang sejalan dengan area tegangan maksimum, memberikan gambaran yang jelas mengenai daerah kelemahan potensial yang perlu mendapat penguatan atau perhatian khusus.

Tabel 5 Tabel Stress dan Deformasi 180 Derajat

180 deg		
H (m)	Stress (MPa)	Deformation (mm)
0.5	13.608	40.789

0.75	13.734	40.925
1	13.788	40.952

Simulasi pada variasi tinggi gelombang 0,5 meter, 0,75 meter, dan 1 meter dengan arah gelombang 180 derajat (*head sea*) menunjukkan peningkatan linier pada nilai bending moment yang selanjutnya mempengaruhi distribusi tegangan dan regangan pada struktur kapal. Bahan HDPE, meskipun memiliki sifat mekanik yang unggul dengan elastisitas dan daya tahan korosi, tetap mengalami peningkatan beban lentur yang harus diantisipasi dalam desain struktural.

Pengaruh peningkatan tinggi gelombang juga menuntut perhatian pada penempatan penyangga dan ketebalan lapisan kapal agar dapat mengakomodasi perubahan beban secara efektif. Distribusi tegangan dan regangan yang terpantau dalam simulasi menunjukkan titik-titik kritis yang perlu menjadi fokus penguatan, sehingga dapat meminimalisir risiko deformasi permanen yang dapat mengganggu performa operasional kapal.

SIMPULAN

Kesimpulan penelitian ini menegaskan bahwa kapal patroli berbahan HDPE mampu menahan beban mekanik akibat variasi tinggi gelombang laut hingga 1 meter dengan performa struktur yang tetap aman dan andal. Berdasarkan simulasi CFD dan analisis FEM, nilai bending moment pada gelombang tertinggi 1 meter mencapai BM_x sebesar -187.423 N.mm dan BM_y sebesar -2.506.187 N.mm. Tegangan maksimum yang terjadi pada material HDPE sebesar 13,788 MPa dengan deformasi mendekati 40,95 mm, yang masih berada dalam batas elastisitas material.

Selain itu, validasi hasil simulasi dengan pengujian konvergensi mesh menunjukkan *error* terkecil sebesar 16,73% pada ukuran mesh 28 mm, yang masih dalam batas toleransi maksimal 20%. Dengan grafik tegangan dan deformasi yang hampir linier mengikuti peningkatan tinggi gelombang, dapat disimpulkan bahwa kapal berbahan HDPE memiliki karakter mekanik yang stabil dan kuat menahan beban dinamis. Keseluruhan hasil ini memberikan dasar yang kuat bagi pengembangan kapal patroli efisien dan tahan lama berbahan HDPE, serta membuka peluang riset lanjutan untuk optimalisasi desain dan performa material kapal di masa depan.

DAFTAR PUSTAKA

- B, H., & Suydam. (1952). *HYDRODYNAMIC CHARACTERISTICS OF A LOW-DRAG, PLANING-TAIL FLYING-BOAT HULL* (1st ed.). NACA.
- Bertram, V. (n.d.). *Practical Ship Hydrodynamics Second edition*. www.bh.com/
- Edward V. Lewis. (1988). *Principles of Naval Architecture (Second Revision), Volume II*. The Society of Naval Architects and marine Engineers.
- Faltinsen, O. M. (Odd M. (2005). *Hydrodynamics of high-speed marine vehicles*. Cambridge University Press.
- Finite element modeling and simulation with ANSYS Workbench (PDFDrive).* (n.d.).
- Fundamentals of Finite Element Analysis.* (n.d.).
- Kyaw, A. Y. (2024). View of Performance Evaluation of Hybrid Propulsion System on Fast Patrol Boat. *Maritime Technology and Society*.
- Li, K., Zheng, D., Wang, Z., Yuan, Z., & Jiang, X. (2022). Numerical investigation of the interception performance of HDPE pontoon-type port safety barrier system under boat attacking. *Ocean Engineering*, 259. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111922>
- Lu, Y., Deng, S., Chen, Y., Xiao, T., Chen, J., Liu, F., Song, S., & Wu, B. (2023). *Effects of wave parameters on load reduction performance for amphibious aircraft with V-hydrofoil*. <http://arxiv.org/abs/2311.06516>
- Manaf, I. A., Marsi, N., Genesan, V., Yusrianto, E., Shariff, H. H., Adnan, S. H., Awang, M., Ali, R., & Jamir, M. R. M. (2021). Compressive strength, sound absorption coefficient (SAC) and water absorption analysis of HDPE plastic waste reinforced polystyrene and Portland cement for lightweight concrete (LWC). *Journal of Physics: Conference Series*, 2051(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2051/1/012043>
- Newman, J. N. (2017). *Marine Hydrodynamics*. The MIT Press.
- Pratama, A. S., Prabowo, A. R., Tuswan, T., Adiputra, R., Muhayat, N., Cao, B., Hadi, S., & Yaningsih, I. (2023). FAST PATROL BOAT HULL DESIGN CONCEPTS ON HYDRODYNAMIC PERFORMANCES AND SURVIVABILITY EVALUATION. *Journal of Applied Engineering Science*, 21(2), 501–531. <https://doi.org/10.5937/jaes0-40698>
- Rahmaji, T., Prabowo, A. R., Tuswan, T., Muttaqie, T., Muhayat, N., & Baek, S. J. (2022). Design of Fast Patrol Boat for Improving Resistance, Stability, and Seakeeping Performance. *Designs*, 6(6). <https://doi.org/10.3390/designs6060105>

- Rawson, K. J., & Tupper, E. C. (2001). *Basic ship theory*. Butterworth-Heinemann.
- Ridwan, M., Sulaiman, Sugeng, S., Sarwoko, & Nies, H. (2022). Mechanical Properties of Small Boat Construction from HDPE Blue Drum Scrap. *TransNav*, 16(3), 573–578.
<https://doi.org/10.12716/1001.16.03.20>
- Seculi, F., Espinach, F. X., Julián, F., Delgado-Aguilar, M., Mutjé, P., & Tarrés, Q. (2022). Evaluation of the Strength of the Interface for Abaca Fiber Reinforced Hdpe and Biope Composite Materials, and Its Influence over Tensile Properties. *Polymers*, 14(24).
<https://doi.org/10.3390/polym14245412>
- Seth, A., & Liem, R. P. (2019). Hydrofoil conceptual design and optimization framework for amphibious aircraft. *AIAA Aviation 2019 Forum*, 1–23. <https://doi.org/10.2514/6.2019-3552>