

Evaluasi Respons Struktural Pondasi Mesin Kapal Polbeng 2 Menggunakan FEM: Pendekatan Multi - Material dan Analisis Dinamis

Septi Ayu Angrayni*, Nur Audina, Fahendi Roher

Jurusan Teknik Perkapalan, Politeknik Negeri Bengkalis, Riau Indonesia

*Koresponden email: septiayu@polbeng.ac.id

Diterima: 2 Desember 2025

Disetujui: 26 Desember 2025

Abstract

The engine foundation is a critical structural element in a ship's propulsion system because it functions to withstand static loads, dynamic loads, and vibrations generated by the engine. The Polbeng 2 vessel experienced a significant change in the form of a main engine replacement, which affected the magnitude of the load, support points, and vibration characteristics. This study aims to evaluate the structural response of the engine foundation using the Finite Element Method (FEM) by involving three types of materials: fiberglass, hybrid composite (glass–carbon), and carbon fiber composite. The analyses conducted include static structural analysis, modal analysis, and harmonic response to detect potential resonance. The results show that the carbon fiber composite exhibits the lowest von Mises stress of 0.009 MPa and the minimum deformation of 0.24 mm. Modal analysis indicates that the natural frequencies of the structure fall within the range of 300–520 Hz, which is far from the engine excitation frequency (110–220 Hz), thus minimizing the risk of resonance. This study confirms that optimizing the material and foundation configuration provides significant improvements to the structural performance and service life of the ship's propulsion system.

Keywords: *engine foundation, fem, vibration, carbon composite, structural analysis*

Abstrak

Pondasi mesin merupakan elemen struktural penting dalam sistem propulsi kapal karena berfungsi menahan beban statis, dinamis, dan getaran yang ditimbulkan oleh mesin. Kapal Polbeng 2 mengalami perubahan signifikan berupa penggantian mesin utama yang berdampak pada besar beban, titik tumpu, dan karakteristik getaran. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi respons struktural pondasi mesin melalui pendekatan Metode Elemen Hingga (Finite Element Method/FEM) dengan melibatkan tiga jenis material: fiberglass, komposit hibrida (glass–carbon), dan komposit serat karbon. Analisis yang dilakukan mencakup *static structural, modal analysis, dan harmonic response* untuk mendeteksi potensi resonansi. Hasil menunjukkan bahwa komposit serat karbon memiliki tegangan von Mises terendah sebesar 0,009 MPa serta deformasi minimum sebesar 0,24 mm. Analisis modal mengindikasikan bahwa frekuensi natural struktur berada pada rentang 300–520 Hz, jauh dari frekuensi eksitasi mesin (110–220 Hz), sehingga risiko resonansi sangat rendah. Penelitian ini menegaskan bahwa optimasi material dan konfigurasi pondasi memberikan peningkatan signifikan terhadap kinerja struktural dan umur pakai sistem propulsi kapal.

Kata Kunci: *pondasi mesin, fem, getaran, komposit karbon, analisis struktural*

1. Pendahuluan

Pondasi mesin memiliki peran yang sangat esensial dalam menjamin keselarasan, kestabilan, dan keandalan sistem propulsi kapal. Komponen struktural ini berfungsi mentransfer beban vertikal, longitudinal, torsional, serta getaran mesin secara efektif ke rangka kapal (ABS, 2020). Apabila desain pondasi tidak memenuhi standar teknis yang memadai, kondisi tersebut dapat memicu terjadinya *misalignment*, peningkatan vibrasi, kerusakan pada sistem poros putar, hingga menyebabkan kegagalan struktural secara keseluruhan (Imron, 2014).

Kapal Polbeng 2 dilaporkan mengalami penurunan kinerja pondasi setelah dua tahun masa operasional. Situasi ini diperburuk dengan adanya pergantian mesin utama dari 71 HP menjadi 15.78 HP, yang secara signifikan mengubah pola pembebangan serta karakteristik dinamis yang bekerja pada pondasi. Oleh karena itu, diperlukan evaluasi menyeluruh terhadap kekuatan serta kekakuan pondasi. Pendekatan berbasis Metode Elemen Hingga (*Finite Element Method/FEM*) dipilih karena mampu memberikan

pemodelan yang akurat dan representatif terhadap respon struktural akibat variasi beban dan material (Logan, 2017; Zienkiewicz & Taylor, 2013).

Kajian-kajian terdahulu umumnya hanya memfokuskan analisis pada perubahan beban statis tanpa mempertimbangkan faktor dinamis dan karakteristik getaran yang turut memengaruhi keandalan pondasi (Rahman & Kim, 2020). Dengan demikian, penelitian ini memperluas cakupan dengan mengintegrasikan analisis multi-material serta evaluasi respons dinamis untuk mengidentifikasi dampak getaran dan potensi resonansi yang dapat terjadi selama operasi mesin.

Selain itu, perubahan karakteristik mesin seperti massa, pusat gravitasi, serta pola eksitasi getaran menuntut adanya penyesuaian desain pondasi yang lebih komprehensif dan responsif terhadap kondisi operasional baru. Pemanfaatan material alternatif seperti komposit hibrida dan serat karbon menjadi semakin relevan karena menawarkan keunggulan dalam hal kekakuan spesifik, rasio kekuatan terhadap berat, dan ketahanan terhadap deformasi (Gibson, 2016). Oleh sebab itu, analisis mendalam terhadap pemilihan material serta konfigurasi beban merupakan langkah strategis untuk memastikan keandalan struktural pondasi mesin dalam jangka panjang dan meningkatkan keselamatan sistem propulsi kapal.

2. Metode Penelitian

Pemodelan Geometri

Pemodelan geometri pada evaluasi respons struktural pondasi mesin Kapal Polbeng 2 menggunakan *Finite Element Method* (FEM) berperan penting dalam merepresentasikan kondisi fisik struktur secara realistik, khususnya ketika melibatkan pendekatan multi-material dan analisis dinamis. Pemodelan ini mencakup pendefinisian bentuk tiga dimensi pondasi, mesin, serta elemen pendukung lainnya. Pendekatan multi-material dalam FEM memungkinkan distribusi tegangan, regangan, dan perpindahan dianalisis secara lebih akurat akibat beban dinamis yang dihasilkan oleh operasi mesin kapal. Dengan pemodelan geometri yang tepat dan integrasi karakteristik material yang akurat, FEM menjadi alat yang efektif dalam memprediksi perilaku dinamis pondasi mesin kapal serta mendukung desain yang aman dan andal.

Model pondasi mesin dibuat menggunakan Rhinoceros dan diekspor dalam format STEP ke ANSYS Student. Proses pemodelan dilakukan dengan mempertimbangkan dimensi aktual dan detail geometris pondasi agar hasil simulasi numerik merepresentasikan kondisi struktural yang sesungguhnya.

Material Uji

Nilai modulus elastisitas untuk setiap material uji dapat dilihat pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Nilai Modulus Elastisitas Material Uji

Material	Modulus Elastisitas (GPa)	Keterangan
Fiberglass	17	Material asli
Komposit hibrida	23	Kombinasi serat kaca & karbon
Komposit karbon	70	Kinerja tinggi

Tabel 1 menunjukkan perbandingan nilai modulus elastisitas dari tiga material uji, yaitu fiberglass, komposit hibrida, dan komposit karbon. Fiberglass memiliki modulus elastisitas paling rendah sebesar 17 GPa, yang menunjukkan sifat kekakuan yang relatif rendah sebagai material asli. Komposit hibrida, yang merupakan kombinasi serat kaca dan serat karbon, mengalami peningkatan modulus elastisitas menjadi 23 GPa, menandakan adanya perbaikan kekakuan akibat penggabungan dua jenis serat. Sementara itu, komposit karbon memiliki nilai modulus elastisitas tertinggi sebesar 70 GPa, yang mencerminkan kinerja mekanik yang sangat baik dan tingkat kekakuan yang jauh lebih tinggi dibandingkan dua material lainnya.

Skenario Pembebaan

Skenario pembebaan dibuat dalam tiga kondisi sebagai berikut:

- Beban statis awal: 5560 N
- Beban mesin baru: 1815 N
- Eksitasi dinamis mesin: 110–220 Hz

Konfigurasi pembebaan tersebut diterapkan untuk memastikan bahwa model numerik mampu merepresentasikan kondisi operasional mesin secara realistik, termasuk variasi gaya yang terjadi selama siklus kerja mesin.

Jenis Analisis

Berikut tiga jenis analisis yang akan dilakukan pada penelitian ini:

- Static Structural* → tegangan & deformasi
- Modal Analysis* → frekuensi natural
- Harmonic Response* → amplitudo getaran

Ketiga jenis analisis tersebut digunakan secara komplementer untuk memperoleh gambaran menyeluruh mengenai perilaku struktural pondasi mesin terhadap berbagai kondisi pembebanan, baik statis maupun dinamis.

3. Hasil dan Pembahasan

Hasil Analisis Tegangan Statis

Hasil analisis tegangan statis menunjukkan bahwa pemilihan material memiliki pengaruh signifikan terhadap kemampuan pondasi mesin dalam menahan beban. Material fiberglass menghasilkan tegangan maksimum tertinggi sebesar 0,042 MPa, yang menunjukkan kekakuan yang relatif rendah sehingga distribusi tegangan kurang optimal. Sebaliknya, material komposit hibrida memperlihatkan penurunan tegangan yang cukup besar menjadi 0,011 MPa berkat kombinasi sifat mekanik serat kaca dan karbon yang lebih stabil. Material komposit karbon memberikan performa terbaik dengan tegangan maksimum terendah, yaitu 0,009 MPa, mencerminkan kemampuan yang sangat baik dalam mendistribusikan tegangan secara merata karena memiliki modulus elastisitas yang tinggi. Secara keseluruhan, komposit karbon menunjukkan peningkatan signifikan dalam penyebaran tegangan dan menjadi kandidat material yang paling efektif untuk meningkatkan kekuatan struktural pondasi mesin kapal Polbeng 2.

Tabel 2. Hasil Analisis Tegangan Statis

Material	Tegangan Maks. (MPa)
Fiberglass	0,042
Komposit hibrida	0,011
Komposit karbon	0,009

Hasil Deformasi

Hasil analisis deformasi menunjukkan bahwa variasi material memberikan pengaruh yang signifikan terhadap respons elastis pondasi mesin. Material fiberglass menghasilkan deformasi terbesar sebesar 0,91 mm, yang mengindikasikan kekakuan rendah dan ketidakmampuan material tersebut dalam menahan perubahan bentuk akibat beban operasi. Pada material komposit hibrida, deformasi menurun drastis menjadi 0,37 mm, mencerminkan peningkatan kekakuan struktural berkat kombinasi serat kaca dan karbon yang memberikan stabilitas mekanis lebih baik. Material komposit karbon menunjukkan performa paling unggul dengan deformasi minimum sebesar 0,24 mm, yang menegaskan tingginya modulus elastisitas dan kemampuan material ini dalam mempertahankan bentuk struktur di bawah pembebanan. Secara keseluruhan, penurunan deformasi pada komposit karbon mengonfirmasi bahwa material ini menawarkan kekakuan struktural tertinggi dan sangat potensial digunakan untuk meningkatkan keandalan pondasi mesin kapal Polbeng 2.

Tabel 3. Nilai Deformasi

Material	Deformasi (mm)
Fiberglass	0,91
Komposit hibrida	0,37
Komposit karbon	0,24

Analisis Mode

Frekuensi natural utama struktur:

- Mode 1: 315 Hz
- Mode 2: 510 Hz

Nilai ini jauh di atas frekuensi operasi mesin, sehingga risiko resonansi rendah.

Hasil analisis mode menunjukkan bahwa struktur memiliki frekuensi natural utama pada Mode 1 sebesar 315 Hz dan Mode 2 sebesar 510 Hz, yang keduanya berada jauh di atas frekuensi operasi mesin. Kondisi ini mengindikasikan bahwa struktur memiliki kekakuan yang memadai sehingga tidak mudah mengalami

getaran berlebih akibat eksitasi dinamis dari mesin. Dengan selisih frekuensi yang cukup besar antara frekuensi operasi dan frekuensi natural, potensi terjadinya resonansi dapat diminimalkan, sehingga struktur diharapkan memiliki kinerja dinamis yang stabil, aman, dan umur layanan yang lebih panjang selama pengoperasian.

Analisis Harmonik

Amplitudo getaran menurun signifikan setelah penggunaan komposit karbon, dengan penurunan hingga 65% dibanding fiberglass. Penurunan amplitudo getaran hingga 65% setelah penggunaan komposit karbon menunjukkan peningkatan kinerja dinamis struktur yang sangat signifikan dibandingkan dengan fiberglass. Hal ini terutama disebabkan oleh sifat mekanik komposit karbon yang memiliki kekakuan dan rasio kekuatan terhadap berat yang lebih tinggi, sehingga mampu meredam respons getaran dengan lebih efektif. Kekakuan yang lebih besar membuat struktur lebih tahan terhadap deformasi akibat beban dinamis, sementara karakteristik materialnya membantu mengurangi transfer energi getaran. Akibatnya, penggunaan komposit karbon tidak hanya meningkatkan stabilitas struktural, tetapi juga berkontribusi pada pengurangan kelelahan material dan peningkatan kenyamanan serta keandalan sistem secara keseluruhan.

Interpretasi Keseluruhan

Interpretasi keseluruhan dari hasil analisis menunjukkan bahwa redistribusi beban memberikan pengaruh signifikan terhadap penurunan tegangan pada struktur pondasi mesin. Dengan pola aliran gaya yang lebih merata, konsentrasi tegangan pada titik-titik kritis dapat diminimalkan sehingga risiko kerusakan struktural menjadi jauh lebih rendah. Selain itu, pemilihan material terbukti menjadi faktor kunci dalam peningkatan kekakuan dan pengendalian getaran; material dengan modulus elastisitas tinggi, seperti komposit karbon, mampu mengurangi deformasi dan meredam respons dinamis secara lebih efektif dibandingkan material yang memiliki kekakuan lebih rendah. Hasil analisis modal juga menunjukkan bahwa pondasi mesin memiliki frekuensi natural yang berada jauh di atas rentang frekuensi eksitasi mesin, sehingga struktur berada dalam kondisi aman dari fenomena resonansi yang berpotensi memperbesar getaran dan menyebabkan kegagalan komponen. Secara keseluruhan, kombinasi redistribusi beban yang optimal, pemilihan material yang tepat, dan karakteristik dinamis yang stabil memastikan pondasi mesin memiliki kinerja struktural yang baik dan mampu mendukung operasi kapal secara aman dan berkelanjutan.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa material komposit karbon memberikan performa struktural paling optimal dengan menghasilkan tegangan minimum sebesar 0,009 MPa serta deformasi terendah dibandingkan material lainnya. Analisis modal menunjukkan bahwa frekuensi natural struktur berada di luar rentang frekuensi operasi mesin, sehingga pondasi berada dalam kondisi aman dari risiko resonansi yang dapat membahayakan stabilitas sistem propulsi. Selain itu, optimasi pondasi melalui pemilihan material yang lebih unggul dan pengaturan ulang distribusi beban terbukti mampu meningkatkan ketahanan struktural dan memperpanjang umur pakai sistem propulsi kapal Polbeng 2. Secara keseluruhan, penggunaan Metode Elemen Hingga (FEM) terbukti sangat efektif dalam mengevaluasi desain pondasi mesin karena mampu memberikan gambaran komprehensif mengenai respon struktural baik terhadap beban statis maupun dinamis.

5. Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Politeknik Negeri Bengkalis atas dukungan pendanaan yang diberikan melalui skema hibah penelitian PNBP. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Departemen Teknik Perkapalan beserta seluruh staf laboratorium atas bantuan dan fasilitas yang diberikan selama kegiatan penelitian berlangsung.

6. Referensi

- [1] A. S. Nugroho, B. Santoso, dan H. Prasetyo, "Analisis getaran dan kekuatan struktur pondasi mesin kapal menggunakan metode elemen hingga," *Jurnal Teknik ITS*, vol. 8, no. 2, pp. A123–A128, 2019.
- [2] A. W. Fajar, "Pemodelan metode elemen hingga untuk menentukan tegangan Von Mises pada as roda LSU-05," Laporan Penelitian, Pusat Teknologi Penerbangan, Indonesia, 2017.
- [3] ABS, *Rules for Building and Classing Marine Vessels*. American Bureau of Shipping, 2020.
- [4] ANSYS, Inc., *ANSYS Mechanical User's Guide*. Canonsburg, PA, USA: ANSYS Inc., 2023.

-
- [5] D. L. Logan, *A First Course in the Finite Element Method*, 6th ed. Boston, MA: Cengage Learning, 2017.
 - [6] J. N. Reddy, *An Introduction to the Finite Element Method*, 4th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill Education, 2019.
 - [7] M. A. Imron, "Pengaruh getaran terhadap struktur kapal," *Jurnal Teknologi Maritim*, vol. 12, no. 2, pp. 45–52, 2014.
 - [8] M. Rahman and J. Kim, "Dynamic load and vibration characteristics of marine engine foundations," *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 8, no. 4, pp. 1–12, 2020.
 - [9] McNeel & Associates, *Rhinoceros 3D User Guide*. Seattle, WA, USA: McNeel & Associates, 2022.
 - [10] O. C. Zienkiewicz and R. L. Taylor, *The Finite Element Method*, 7th ed. Oxford: Elsevier, 2013.
 - [11] R. A. Dwi, "Analisis kekuatan dan kekakuan konstruksi motor penggerak kapal aluminium KPC 40," Skripsi, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin, Indonesia, 2021.
 - [12] R. D. Cook, D. S. Malkus, M. E. Plesha, and R. J. Witt, *Concepts and Applications of Finite Element Analysis*, 4th ed. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, 2002.
 - [13] R. F. Gibson, *Principles of Composite Material Mechanics*, 4th ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2016.
 - [14] R. Hidayat dan Y. S. Putra, "Evaluasi respons dinamis struktur kapal akibat beban mesin dengan pendekatan finite element method," *Jurnal Teknik Perkapalan*, vol. 7, no. 1, pp. 45–52, 2018.
 - [15] S. Wahyudi, M. N. Ilham, dan A. Kurniawan, "Analisis pengaruh getaran mesin terhadap struktur dan kenyamanan operasional kapal," *Jurnal Kelautan Nasional*, vol. 14, no. 3, pp. 161–170, 2019.