



Analisis Dampak Getaran pada Struktur dan Performa Kapal Menggunakan Metode Pemantauan berbasis Sensor Mems

Andi Fahim

Universitas Pertahanan Republik Indonesia

Email : andifahimhsn@gmail.com

Article Info

Article history:

Received July 20, 2025

Revised October 10, 2025

Accepted October 23, 2025

Keywords:

Ship Vibration, MEMS Sensors, FFT Analysis, Predictive Maintenance, Fuel Efficiency, Machine Learning

ABSTRACT

The ballast system is a critical component in ships that plays a role in maintaining stability, trim, and safety during sailing operations. With technological developments, smart ballast control systems are introduced as innovations to optimize ballast management automatically and precisely. This research aims to analyze the effect of implementing a sensor and microcontroller-based smart ballast control system on ship stability and operational efficiency. Computational simulation models will be used to model ship dynamics with conventional ballast systems and smart ballast systems. This research uses a PID (Proportional-Integral-Derivative) control approach integrated with machine learning algorithms to optimize ballast water distribution automatically. System response will be tested using simulators in different sea conditions, including normal and extreme conditions. The analysis will focus on stabilization time, energy consumption, and trim accuracy. Simulation results show that the smart ballast control system can reduce stabilization time by up to 37%, save pump energy consumption by up to 25%, and improve trim accuracy by up to 0.2 degrees compared to conventional systems. However, the implementation of a smart ballast system requires a larger initial investment and more complex maintenance.

This is an open access article under the [CC BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.



Article Info

Article history:

Received July 20, 2025

Revised October 10, 2025

Accepted October 23, 2025

Kata Kunci:

Getaran Kapal, Sensor MEMS, Analisis FFT, Pemeliharaan Prediktif, Efisiensi Bahan Bakar, Machine Learning

ABSTRAK

Getaran pada kapal merupakan fenomena kompleks yang dapat berdampak signifikan terhadap struktur, performa operasional, dan kenyamanan awak kapal. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dampak getaran terhadap struktur dan performa kapal melalui implementasi sistem pemantauan berbasis sensor MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems). Metodologi penelitian meliputi pemasangan jaringan sensor MEMS pada lokasi-lokasi kritis di kapal kontainer berukuran sedang, pengumpulan data secara real-time selama operasi pelayaran, serta analisis data menggunakan metode FFT (Fast Fourier Transform) dan wavelet. Penelitian ini mengembangkan model prediktif berbasis machine learning untuk mengidentifikasi pola getaran abnormal dan mengkorelasikannya dengan kondisi sistem propulsi, struktur lambung, dan efisiensi bahan bakar. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pemantauan getaran secara real-time dapat mendeteksi anomali pada sistem propulsi hingga 72 jam sebelum terjadi kegagalan, mengidentifikasi penurunan integritas struktur kapal pada tahap awal, serta mengkorelasikan peningkatan getaran dengan kenaikan konsumsi bahan bakar sebesar 7-12%. Implementasi sistem pemantauan berbasis sensor MEMS ini terbukti dapat mengoptimalkan jadwal pemeliharaan preventif, memperpanjang umur komponen kapal, dan meningkatkan efisiensi operasional secara keseluruhan. Meskipun demikian, tantangan dalam



implementasi termasuk kebutuhan instalasi dan kalibrasi yang presisi, serta pengolahan data yang kompleks untuk membedakan getaran normal dan abnormal dalam berbagai kondisi operasi kapal.

This is an open access article under the [CC BY-SA](#) license.



Corresponding Author:

Andi Fahim

Universitas Pertahanan Republik Indonesia

E-mail: andifahimhsn@gmail.com

PENDAHULUAN

Getaran pada kapal merupakan fenomena yang tidak dapat dihindari dan memiliki dampak signifikan terhadap berbagai aspek operasional kapal. Getaran ini bersumber dari sistem propulsi, mesin utama, gelombang laut, dan interaksi struktural kompleks yang terjadi saat kapal beroperasi [1]. Meskipun tingkat getaran tertentu dianggap normal dalam operasi kapal, getaran berlebih dapat menyebabkan kelelahan material, kerusakan struktural, penurunan kinerja sistem, ketidaknyamanan awak kapal, dan peningkatan konsumsi bahan bakar [2].

Dalam dekade terakhir, penelitian mengenai getaran kapal telah mengalami perkembangan signifikan. Barhoumi dan Storhaug [3] mengkaji korelasi antara getaran lambung kapal dengan beban gelombang pada kapal kontainer berukuran besar, namun penelitian tersebut terbatas pada analisis pasca-kejadian tanpa kemampuan prediktif. Di sisi lain, Liu et al. [4] menerapkan metode elemen hingga untuk mensimulasikan dampak getaran pada struktur kapal, tetapi validasi empiris masih kurang komprehensif. Wang dan Zhang [5] mengembangkan sistem pemantauan getaran berbasis akselerometer konvensional yang menunjukkan peningkatan dalam deteksi anomali getaran, namun memiliki keterbatasan dalam sensitivitas dan rentang frekuensi.

Seiring perkembangan teknologi sensor, MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) telah membuka peluang baru dalam pemantauan getaran dengan keunggulan berupa ukuran kompak, konsumsi daya rendah, sensitivitas tinggi, dan kemampuan integrasi dengan sistem digital [6]. Namun, implementasi sensor MEMS untuk pemantauan getaran kapal secara real-time dan analisis prediktif masih belum dieksplorasi secara menyeluruh, terutama dalam kaitannya dengan efisiensi operasional dan pemeliharaan preventif.

Penelitian ini bertujuan untuk mengisi kesenjangan tersebut dengan mengembangkan dan mengimplementasikan sistem pemantauan getaran kapal berbasis sensor MEMS yang terintegrasi dengan algoritma machine learning untuk analisis prediktif. Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang cenderung berfokus pada aspek teknis getaran atau pemodelan teoretis, penelitian ini mengadopsi pendekatan holistik yang menghubungkan data getaran dengan parameter operasional kapal secara langsung. Kebaruan (novelty) penelitian ini terletak pada pengembangan model korelasi antara pola getaran spesifik dengan kondisi sistem propulsi, integritas struktur, dan efisiensi bahan bakar, yang memungkinkan prediksi dini terhadap potensi kegagalan dan optimasi operasional.



Permasalahan utama yang diaddress dalam penelitian ini meliputi: (1) bagaimana karakteristik getaran pada berbagai lokasi kritis di kapal berkorelasi dengan kondisi sistem propulsi dan struktur; (2) sejauh mana pemantauan getaran dapat digunakan untuk memprediksi kegagalan komponen sebelum terjadi; dan (3) bagaimana implementasi sistem pemantauan getaran berbasis MEMS dapat mengoptimalkan efisiensi operasional dan jadwal pemeliharaan kapal.

Pendekatan metodologis yang digunakan melibatkan instalasi jaringan sensor MEMS pada lokasi-lokasi strategis di kapal kontainer berukuran sedang, pengumpulan data getaran selama berbagai kondisi operasional, analisis spektral menggunakan FFT dan wavelet, serta pengembangan model prediktif berbasis machine learning. Hasil penelitian diharapkan memberikan kontribusi signifikan dalam pengembangan sistem manajemen pemeliharaan kapal berbasis kondisi (condition-based maintenance) dan optimasi operasional untuk peningkatan efisiensi dan keselamatan.

METODE

Desain Eksperimental

Penelitian ini dilaksanakan pada kapal kontainer berukuran sedang dengan spesifikasi: panjang 145 meter, lebar 23 meter, draft 9,5 meter, dan kapasitas 1200 TEU. Sistem propulsi kapal terdiri dari mesin diesel 2-stroke dengan daya 15.000 kW yang terhubung ke baling-baling tunggal melalui sistem poros.

Jaringan sensor MEMS diimplementasikan pada 12 lokasi kritis di kapal yang mencakup

- Dudukan mesin utama (3 titik)
- Sistem poros (3 titik)
- Struktur lambung dekat buritan (2 titik)
- Struktur lambung di midship (2 titik)
- Struktur lambung dekat haluan (2 titik)

Sensor yang digunakan adalah akselerometer MEMS tiga-sumbu dengan spesifikasi: rentang pengukuran $\pm 16g$, sensitivitas 2mg, bandwidth 0-2.000 Hz, dan kemampuan sampling hingga 10 kHz. Sensor dilengkapi dengan sistem pendingin untuk menjaga stabilitas operasi dan terhubung ke unit akuisisi data sentral melalui jaringan komunikasi redundan.

Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan selama periode 6 bulan yang mencakup berbagai kondisi operasional kapal:

- Kondisi pelayaran normal pada berbagai kecepatan (10-20 knot)
- Manuver (termasuk berbelok dan perlambatan/percepatan)
- Kondisi cuaca bervariasi (laut tenang hingga badai skala Beaufort 7)
- Variasi kondisi beban (muatan kosong hingga penuh)

Parameter yang direkam meliputi:

- Data getaran tiga-sumbu dari semua sensor (10 Hz - 1.000 Hz)
- Parameter operasional kapal: kecepatan, RPM mesin, beban mesin, konsumsi bahan bakar



- Data lingkungan: tinggi gelombang, arah gelombang, kecepatan angin
- Status mesin dan sistem propulsi dari sistem monitoring kapal

Sistem akuisisi data diprogram untuk merekam data kontinyu pada frekuensi sampling 5 kHz dengan periode penyimpanan 10 menit dan tambahan rekaman khusus saat terdeteksi anomali.

Metode Analisis Data

Pengolahan dan analisis data dilakukan melalui beberapa tahap:

Pra-pemrosesan data:

- Filtering untuk menghilangkan noise
- Normalisasi dan kalibrasi data sensor
- Segmentasi data berdasarkan kondisi operasional

Analisis domain waktu:

- Perhitungan nilai RMS, peak-to-peak, dan crest factor
- Analisis statistik untuk mengidentifikasi tren dan outlier

Analisis domain frekuensi:

- Fast Fourier Transform (FFT) untuk mengidentifikasi komponen frekuensi dominan
- Analisis spektrogram untuk mengevaluasi perubahan karakteristik getaran terhadap waktu
- Analisis wavelet untuk deteksi transien dan fenomena non-stasioner

Analisis korelasi:

- Korelasi antara data getaran dengan parameter operasional
- Identifikasi hubungan antara pola getaran spesifik dengan kondisi sistem dan komponen

Pengembangan model prediktif:

- Implementasi algoritma machine learning (Random Forest, SVM, dan LSTM) untuk klasifikasi kondisi dan prediksi kegagalan
- Validasi model menggunakan teknik cross-validation dan pengujian dengan dataset independen

Kriteria Evaluasi

Efektivitas sistem pemantauan getaran dievaluasi berdasarkan kriteria berikut:

- Akurasi dalam mendeteksi anomali getaran (sensitivitas dan spesifisitas)
- Lead time prediksi kegagalan (waktu antara deteksi awal dan kegagalan aktual)
- Korelasi antara indikator getaran dan efisiensi bahan bakar
- Dampak implementasi sistem terhadap jadwal pemeliharaan dan downtime

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Getaran pada Lokasi Kritis

Analisis data getaran menunjukkan perbedaan signifikan pada karakteristik getaran di berbagai lokasi pemantauan. Gambar 1 menampilkan profil spektral getaran pada tiga lokasi



utama (dudukan mesin, sistem poros, dan midship) dalam kondisi operasional normal pada kecepatan 15 knot.

Gambar 1. Profil spektral getaran pada tiga lokasi utama kapal dalam kondisi operasional normal (15 knot).

Tabel 1. merangkum nilai RMS getaran pada lokasi kritis dalam berbagai kondisi operasional.

Lokasi sensor	Idle (RPM) min	Cruise (15 knot)	Full speed (20 knot)	Manuver
Dudukan mesin	2.3 ± 0.4	4.7 ± 0.6	7.2 ± 0.8	6.5 ± 1.2
Sistem poros	1.8 ± 0.3	5.2 ± 0.5	8.4 ± 0.7	7.1 ± 1.4
Buritan	1.5 ± 0.2	3.8 ± 0.4	6.3 ± 0.6	5.2 ± 0.9
Midship	0.9 ± 0.2	2.1 ± 0.3	3.5 ± 0.5	4.8 ± 0.8
Haluan	1.2 ± 0.3	2.8 ± 0.4	4.2 ± 0.6	3.9 ± 0.7

Dari analisis spektral yang dilakukan, teridentifikasi bahwa:

- Getaran pada dudukan mesin didominasi oleh komponen frekuensi yang berkorelasi dengan kecepatan rotasi mesin (7-12 Hz) dan frekuensi pembakaran (50-70 Hz).
- Sistem poros menunjukkan komponen getaran torsional pada 15-25 Hz dan getaran lateral pada 30-40 Hz yang berkorelasi dengan ketidakseimbangan dan misalignment.
- Struktur lambung di midship menunjukkan respons getaran pada frekuensi rendah (2-5 Hz) yang berkorelasi dengan eksitasi gelombang dan getaran global kapal.

Analisis korelasi menunjukkan hubungan non-linear antara kecepatan kapal dan amplitudo getaran, dengan peningkatan signifikan pada kecepatan di atas 17 knot. Selain itu, kondisi pemuatan kapal mempengaruhi karakteristik getaran, dengan amplitudo getaran pada struktur lambung 15-25% lebih tinggi pada kondisi muatan kosong dibandingkan muatan penuh akibat perbedaan respons hidrodinamik.

Deteksi Anomali dan Prediksi Kegagalan

Implementasi algoritma machine learning untuk deteksi anomali berhasil mengidentifikasi pola getaran abnormal dengan tingkat akurasi 91.3%. Selama periode penelitian, sistem berhasil mendeteksi tiga kasus anomali signifikan.

- Ketidakseimbangan baling-baling akibat kerusakan minor pada salah satu daun
- Degradasi bearings pada sistem poros
- Retak awal pada struktur penopang mesin



Pada kasus ketidakseimbangan baling-baling, sistem mendeteksi peningkatan getaran pada frekuensi spesifik (blade-pass frequency dan harmoniknya) 72 jam sebelum inspeksi fisik mengkonfirmasi kerusakan.

Model prediktif berbasis LSTM menunjukkan performa superior dalam prediksi progresivitas kerusakan dengan Mean Absolute Error (MAE) sebesar 0.15 mm/s untuk proyeksi getaran RMS dan 83% akurasi dalam estimasi remaining useful life (RUL) komponen.

Korelasi Getaran dengan Efisiensi Operasional

Analisis korelasi antara tingkat getaran dan parameter operasional kapal mengungkapkan hubungan signifikan antara getaran abnormal dengan peningkatan konsumsi bahan bakar. Tabel 2 menunjukkan perbandingan konsumsi bahan bakar spesifik (g/kWh) dalam kondisi getaran normal dan abnormal.

Tabel 2. Konsumsi bahan bakar spesifik (g/kWh) dalam kondisi getaran normal dan abnormal.

Kecepatan kapal	Getaran normal	Getaran abnormal	Peningkatan
10 knot	185.3 ± 3.2	198.6 ± 4.1	7.2
15 knot	192.7 ± 3.5	210.3 ± 4.3	9.1
20 knot	208.5 ± 4.1	233.5 ± 5.2	12.0

Peningkatan getaran berhubungan dengan bertambahnya resistensi hidrodinamik akibat deformasi mikro pada permukaan lambung dan penurunan efisiensi propulsi karena ketidakseimbangan sistem. Analisis regresi multivariat mengidentifikasi threshold getaran kritis (5.8 mm/s RMS pada sistem poros) yang menjadi titik awal penurunan efisiensi operasional yang signifikan.

Implementasi Sistem Pemantauan dalam Strategi Pemeliharaan

Berdasarkan hasil analisis, dikembangkan framework pemeliharaan prediktif yang mengintegrasikan data getaran dengan jadwal pemeliharaan kapal. Implementasi framework ini menghasilkan:

- Pengurangan waktu henti mesin (downtime) sebesar 35% dibandingkan dengan jadwal pemeliharaan konvensional
- Penghematan biaya pemeliharaan sebesar 23% melalui penggantian komponen berdasarkan kondisi aktual, bukan interval waktu tetap
- Perpanjangan umur komponen kritis hingga 15-20% melalui identifikasi dan mitigasi dini kondisi abnormal



Tantangan dan Keterbatasan

Meskipun menunjukkan hasil yang menjanjikan, implementasi sistem pemantauan getaran berbasis MEMS menghadapi beberapa tantangan:

- Kompleksitas instalasi dan kalibrasi sensor yang memerlukan keahlian khusus
- Keterbatasan daya tahan sensor dalam lingkungan kapal yang korosif dan bergetaran tinggi
- Volume data besar yang memerlukan infrastruktur penyimpanan dan pemrosesan yang substansial
- Kesulitan dalam membedakan getaran abnormal akibat kerusakan komponen dari variasi getaran normal akibat kondisi laut yang berbeda

Untuk mengatasi tantangan terakhir, dikembangkan algoritma kompensasi kondisi lingkungan yang memperhitungkan data gelombang dan angin dalam analisis getaran. Algoritma ini meningkatkan akurasi deteksi anomali sebesar 12% dalam kondisi laut bergelombang.

KESIMPULAN

Penelitian ini telah berhasil mengembangkan dan mengimplementasikan sistem pemantauan getaran berbasis sensor MEMS yang mampu menganalisis dampak getaran terhadap struktur dan performa kapal secara komprehensif. Melalui pendekatan analisis spektral dan implementasi algoritma machine learning, sistem ini mampu mendeteksi anomali getaran hingga 72 jam sebelum terjadinya kegagalan komponen, mengidentifikasi korelasi antara peningkatan getaran dengan penurunan efisiensi bahan bakar sebesar 7-12%, serta mengoptimalkan jadwal pemeliharaan yang menghasilkan pengurangan downtime sebesar 35%.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa karakteristik getaran pada berbagai lokasi kritis di kapal memiliki pola spesifik yang dapat digunakan sebagai indikator diagnostik untuk kondisi sistem propulsi dan struktur kapal. Implementasi model prediktif berbasis LSTM terbukti efektif dalam memproyeksikan perkembangan kerusakan dan mengestimasi sisa umur pakai komponen dengan akurasi tinggi. Framework pemeliharaan prediktif yang dikembangkan berdasarkan analisis getaran memberikan manfaat ekonomis signifikan melalui optimasi jadwal pemeliharaan dan perpanjangan umur komponen.

Penelitian ini membuka peluang bagi pengembangan sistem manajemen kesehatan kapal (ship health management system) yang lebih komprehensif di masa depan. Integrasi data getaran dengan parameter operasional lain seperti emisi gas buang, termal, dan kebisingan dapat memberikan gambaran yang lebih holistik tentang kondisi kapal. Lebih lanjut, implementasi edge computing untuk pemrosesan data getaran pada kapal dan pengembangan model prediktif yang lebih adaptif terhadap variasi kondisi operasional merupakan arah penelitian yang menjanjikan untuk meningkatkan efektivitas sistem pemantauan getaran pada kapal.



DAFTAR PUSTAKA

- S. Wang, H. Zhang. 2018, "Vibration monitoring and analysis in marine propulsion systems: A comprehensive review." *Ocean Engineering*, Vol. 173, 227-240.
- M. Julianto, K. Firmansyah, P. Pratama. 2019, "Pengaruh getaran propeller terhadap kelelahan material struktur buritan kapal tanker." *Jurnal Teknik Perkapalan*, Vol. 7(2), 121-135.
- E. Barhoumi, G. Storhaug. 2020, "Correlation between hull girder vibration and wave loading on large container vessels." *Applied Ocean Research*, Vol. 94, 101970.
- J. Liu, X. Zhang, H. Xu, Z. Wang. 2020, "Finite element analysis and experimental validation of ship structure vibration under different operating conditions." *Journal of Marine Science and Engineering*, Vol. 8(6), 425.
- T. Priyambodo, S. Haryanti. 2021, "Aplikasi sensor vibrasi dalam pemantauan kondisi sistem propulsi kapal." *Jurnal Teknologi Maritim*, Vol. 4(1), 32-41.
- R. Kumar, P. Singh, R. Patel. 2021, "MEMS-based vibration monitoring in marine applications: Opportunities and challenges." *IEEE Sensors Journal*, Vol. 21(8), 9876-9887.
- H. Nugroho, A. Wibowo, D. Putra. 2022, "Machine learning approach for predicting machinery failures based on vibration signatures in maritime applications." *Marine Technology Society Journal*, Vol. 56(3), 78-92.
- K. Yamamoto, S. Takahashi, N. Suzuki. 2022, "Advanced signal processing techniques for shipboard vibration monitoring and fault diagnosis." *Journal of Marine Engineering & Technology*, Vol. 21(2), 83-97.
- L. Wang, Q. Zhou, H. Li. 2023, "Wavelet-based feature extraction and neural network classification for ship propulsion system vibration analysis." *Ocean Engineering*, Vol. 268, 113353.
- G. Rahman, N. Santoso, B. Widodo. 2023, "Implementation of condition-based maintenance strategy using vibration monitoring for marine diesel engines." *Marine Structures*, Vol. 88, 103438.
- V. Martinez, C. Rodriguez, A. Gomez. 2024, "Digital twin development for real-time ship vibration analysis and operational optimization." *Ships and Offshore Structures*, Vol. 19(1), 11-25.
- D. Setiawan, R. Hakim, M. Firdaus. 2024, "Analisis korelasi getaran abnormal dengan konsumsi bahan bakar pada kapal kontainer." *Jurnal Teknologi Kelautan*, Vol. 8(1), 45-58.