

## **PENDEKATAN INERTIAL MEASUREMENT BERBASIS MEMS UNTUK MONITORING ROLL, PITCH, DAN YAW BERBIAYA RENDAH PADA STUDI SEAKEEPING**

*A Mems Inertial Measurement Approach For Low-Cost Monitoring Of Roll, Pitch, And Yaw In Seakeeping*

Yuni Ari Wibowo, Arif Baswantara, Anas Noor Firdaus, Afriana Kusdinar, Atik Ghina Destiana<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Politeknik Kelautan dan Perikanan Pangandaran, Jawa Barat, Indonesia*

### **ABSTRAK**

Pengujian seakeeping berperan penting dalam mengevaluasi keselamatan dan kinerja struktur terapung yang bersifat dinamis. Namun, metode konvensional umumnya memerlukan sensor berbiaya tinggi serta fasilitas khusus seperti Maneuvering Ocean Basin (MOB), sehingga penggunaannya menjadi terbatas. Penelitian ini mengusulkan sistem pengukuran berbiaya rendah untuk monitoring gerak rotasi kapal (roll, pitch, dan yaw) dengan memanfaatkan sensor microelectromechanical systems (MEMS), berupa accelerometer dan gyroscope MPU-6050 yang dikombinasikan dengan magnetometer HMC5883L. Proses kalibrasi dilakukan dengan membandingkan hasil pengukuran terhadap sensor acuan berpresisi tinggi, yaitu 3DM-GX5-25, pada kondisi statis dan dinamis. Kalibrasi statis dilakukan menggunakan busur derajat/ mechanical protractor untuk memperoleh faktor koreksi dan model regresi linier, sedangkan pengujian dinamis dilaksanakan pada meja osilasi guna mengevaluasi respons sensor terhadap gerak periodik. Hasil kalibrasi menunjukkan tingkat kesalahan sebesar 2,48% untuk roll dan 15,96% untuk pitch, yang memperlihatkan kesesuaian yang baik dengan sensor acuan, sementara pengukuran yaw menunjukkan tingkat kesalahan yang relatif lebih tinggi, yaitu 88,08%, yang mengindikasikan adanya keterbatasan akurasi pada konfigurasi sensor yang digunakan, terutama pada pembacaan berdasarkan acuan true north. Meskipun demikian, sistem yang dikembangkan tetap menunjukkan potensi sebagai solusi yang andal dan ekonomis untuk pengukuran gerak rotasi dalam studi seakeeping, khususnya untuk evaluasi roll dan pitch, serta sebagai dasar pengembangan lebih lanjut dalam pengukuran yaw.

Kata kunci: Seakeeping, mems, accelerometer-gyroscope, gerakan rotasional

### **ABSTRACT**

*Seakeeping tests are crucial for assessing the safety and dynamic performance of floating structures. However, conventional approaches often rely on costly sensors and specialized facilities such as the Maneuvering Ocean Basin (MOB), limiting broader access to motion evaluation. This study presents a low-cost measurement system for monitoring rotational ship motions (roll, pitch, and yaw) using microelectromechanical systems (MEMS) sensors, namely the MPU-6050 accelerometer and gyroscope combined with an HMC5883L magnetometer. Calibration was conducted against a high-precision reference sensor, the 3DM-GX5-25, under both static and dynamic conditions. Static calibration utilized a precision mechanical protractor to determine correction factors and linear regression models, while the dynamic validation was performed on an oscillation table to assess the sensor response under periodic motion. Calibration results indicate error levels of 2.48% for roll and 15.96% for pitch, showing good agreement with the reference sensor, while yaw measurements exhibit a relatively higher error of 88.08%, indicating limitations in measurement accuracy associated with the employed sensor configuration, particularly in readings referenced to true north. Nevertheless, these findings highlight the potential of the proposed system as a reliable and cost-effective alternative for rotational motion measurements in*

*seakeeping studies, particularly for roll and pitch evaluation, and as a basis for further improvement in yaw measurement accuracy, thereby enabling wider accessibility to ship motion performance evaluation.*

*Keywords: Seakeeping, mems, accelerometer-gyroscope, rotational motion*

## **Pendahuluan**

Struktur terapung memiliki peran penting dalam berbagai sektor, seperti transportasi laut, produksi energi lepas pantai, akuakultur, serta keterkaitannya dengan operasi pantai. Oleh karena itu, aspek keselamatan operasional dan kinerja struktur terapung menjadi hal yang sangat krusial. Salah satu indikator utama dalam menilai keselamatan dan fungsi operasional tersebut adalah respons dinamik struktur terapung terhadap beban lingkungan (gelombang, angin, dan arus), yang umumnya direpresentasikan dalam enam derajat kebebasan (six degrees of freedom/6DOF), meliputi gerakan translasi (heave, surge, sway) dan gerakan rotasi (roll, pitch, yaw). Di antara komponen tersebut, respons gerakan rotasional memiliki peran yang sangat signifikan karena berpengaruh langsung terhadap stabilitas kapal, kenyamanan penumpang, serta pemenuhan standar keselamatan yang ditetapkan oleh International Maritime Organization (IMO, 2008).

Metode konvensional untuk pengukuran olah gerak kapal umumnya mengandalkan sensor inersia berpresisi tinggi yang dipadukan dengan sistem akuisisi data yang kompleks. Meskipun memiliki tingkat akurasi yang baik, solusi tersebut cenderung berbiaya tinggi dan memerlukan fasilitas pengujian khusus, seperti maneuvering basin atau seakeeping basin. Kondisi ini menjadi kendala utama bagi pemilik kapal skala kecil, institusi pendidikan, serta laboratorium penelitian, meskipun kebutuhan akan sistem monitoring olah gerak yang andal terus meningkat. Sebagaimana ditunjukkan oleh Abankwa et al. (2015, 2016), pengukuran gerak kapal menggunakan sistem IMU yang mampu menangkap respons 6DOF dengan tingkat akurasi yang tinggi, memerlukan sensor komersial berkelas tinggi yang masih menjadi hambatan bagi penerapan yang lebih luas.

Perkembangan teknologi microelectromechanical systems (MEMS) dalam beberapa tahun terakhir telah menghadirkan sensor inersia berbiaya rendah yang berpotensi diaplikasikan pada lingkungan kelautan. Namun demikian, sebagaimana dilaporkan oleh Yang et al. (2024), sensor-sensor ini masih menghadapi tantangan terkait stabilitas kalibrasi, efek drift pada jangka panjang, serta ketahanan terhadap pengaruh lingkungan, terutama jika dibandingkan dengan sensor acuan berpresisi tinggi (LORD, 2024). Menyikapi tantangan tersebut, penelitian ini mengembangkan dan memvalidasi sistem pengukuran gerakan rotasional berbiaya rendah untuk aplikasi seakeeping. Sistem yang diusulkan mengombinasikan accelerometer-gyroscope MPU-6050 dengan magnetometer HMC5883L untuk merekam gerak roll, pitch, dan yaw dalam satu konfigurasi IMU berbasis MEMS yang ringkas. Kinerja sistem ini dievaluasi dengan membandingkannya terhadap sensor acuan berpresisi tinggi, yaitu LORD MicroStrain 3DM-GX5-25 IMU, yang dilengkapi dengan algoritma filtering dan dynamic compensation tingkat lanjut untuk estimasi attitude (LORD, 2024). Pengujian dilakukan pada kondisi statis dan dinamis guna menilai akurasi respons serta kestabilan temporal dari konfigurasi MEMS yang dikembangkan.

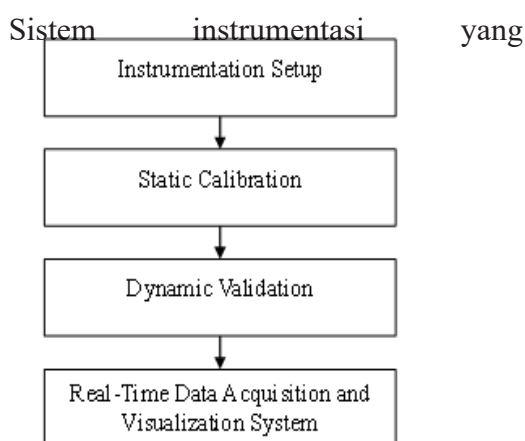
Kontribusi utama penelitian ini adalah pengembangan dan validasi sistem IMU berbasis MEMS berbiaya rendah untuk pengukuran gerakan rotasional dalam studi seakeeping melalui perbandingan langsung dengan sensor acuan berpresisi tinggi pada kondisi statis dan dinamis. Pendekatan ini memberikan evaluasi kuantitatif terhadap akurasi dan keterbatasan sistem, menunjukkan kinerja yang baik pada pengukuran roll dan pitch, serta mengidentifikasi tantangan utama

pada estimasi yaw berbasis magnetometer. Dengan demikian, penelitian ini menyediakan dasar eksperimental bagi pemanfaatan sistem monitoring gerak kapal yang lebih terjangkau.

### Metodologi

Metodologi penelitian ini terdiri atas empat tahapan utama, sebagaimana ditunjukkan pada diagram flowchart (Gambar 1). Tahap pertama, Instrumentation Setup, meliputi proses konfigurasi dan verifikasi sensor accelerometer-gyroscope MPU-6050 serta magnetometer HMC5883L untuk memastikan komunikasi data yang andal. Tahap kedua, Static Calibration, bertujuan untuk menetapkan faktor koreksi dan menyusun model regresi linier dengan menggunakan acuan mekanik berpresisi tinggi. Tahap ketiga, Dynamic Validation, dilakukan untuk mengevaluasi kinerja sensor pada kondisi gerak osilasi terkontrol melalui perbandingan hasil pengukuran dengan sensor acuan berpresisi tinggi, yaitu 3DM-GX5-25. Tahap keempat, Real-Time Data Acquisition and Visualization System, mengimplementasikan antarmuka berbasis Python untuk melakukan monitoring dan visualisasi gerakan roll, pitch, dan yaw secara real time.

#### Instrumentation Setup



Gambar 1 Metodologi Riset  
*Figure 1 Research Methodology*

dikembangkan menggunakan mikrokontroler ESP32-DevKitC-VE-WROVER yang dihubungkan dengan dua sensor utama, yaitu

MPU6050 (accelerometer dan gyroscope 6-DOF) serta HMC5883L (magnetometer tiga sumbu). Kombinasi kedua sensor tersebut membentuk sebuah inertial measurement unit (IMU) yang ringkas dan mampu mengukur gerakan rotasi, meliputi roll, pitch, dan yaw.

Sensor HMC5883L secara khusus digunakan untuk menentukan sudut yaw (heading) melalui pengukuran medan magnet bumi, sehingga menyediakan informasi orientasi yang melengkapi data inersia dari MPU6050. Konfigurasi ini memungkinkan estimasi gerakan rotasi yang lebih komprehensif serta memfasilitasi perbandingan langsung dengan sensor acuan 3DM-GX5-25 selama proses kalibrasi dan validasi.

Perangkat instrumentasi ditempatkan dalam kotak berukuran  $14,5 \times 9,5 \times 5$  cm dan ditenagai oleh dua baterai Li-ion 18650 (masing-masing 4 V) (Gambar 2). Transmisi data dilakukan secara nirkabel menggunakan protokol ESP-NOW, di mana modul pemancar (ESP32-DevKitC-VE-WROVER) mengirimkan data pengukuran secara real time ke modul penerima (ESP32-WROOM-32E). Data yang diterima selanjutnya direkam langsung pada laptop untuk keperluan analisis. Tabel 1 menyajikan parameter perbandingan antara sensor MPU6050 dan HMC5883L yang digunakan dalam sistem ini, serta sensor 3DM-GX5-25 yang berperan sebagai acuan dalam proses kalibrasi dan validasi.

Data gyroscope dan accelerometer dari MPU6050 digunakan untuk menghitung sudut roll dan pitch, sedangkan magnetometer HMC5883L menyediakan informasi heading yang diperlukan untuk estimasi yaw. Untuk meningkatkan keandalan data dan mengurangi efek drift, luaran sensor diproses menggunakan algoritma filtering yang diimplementasikan langsung pada mikrokontroler. Data hasil pemrosesan kemudian ditransmisikan secara nirkabel ke modul penerima melalui protokol ESP-NOW, sehingga memungkinkan akuisisi data secara real time tanpa memerlukan jaringan Wi-Fi. Modul pemancar (ESP32-DevKitC) diprogram menggunakan Arduino

IDE (C/C++), sedangkan modul penerima (ESP32-WROOM-32E) dikonfigurasi untuk menerima, menampilkan, dan menyimpan data melalui antarmuka berbasis Python. Struktur komunikasi ini memungkinkan akuisisi data real time dengan latensi rendah dan konsumsi daya yang relatif kecil

*Prosedur Kalibrasi dan Validasi*

Proses kalibrasi dilakukan untuk mengevaluasi akurasi kinerja sensor



Gambar 2 Instrumentation Setup  
Figure 2 Instrumentation Setup

Tabel 1 Tabel perbandingan spesifikasi sensor MPU6050, HMC5883L dan 3DM-GX5-25  
Table 1 Comparison table of MPU6050, HMC5883L and 3DM-GX5-25 sensor specifications

	MPU6050	HMC5883L	3DM-GX5-25
<b>Sensor Type</b>	6-DOF IMU (3-axis accelerometer + 3-axis gyroscope)	3-axis magnetometer	9-DOF AHRS (3-axis accelerometer, gyroscope, and magnetometer)
<b>Measurement Range (Accelerometer)</b>	±2, ±4, ±8, ±16 g	-	±8 g
<b>Measurement Range (Gyroscope)</b>	±250, ±500, ±1000, ±2000 °/s	-	±300 °/s
<b>Measurement Range (Magnetometer)</b>	-	±8.1 Gauss	±8 Gauss
<b>Resolution (Accelerometer)</b>	16-bit	-	16-bit
<b>Resolution (Gyroscope)</b>	16-bit	-	16-bit
<b>Resolution (Magnetometer)</b>	-	12-bit	16-bit
<b>Sampling Rate</b>	Up to 1 kHz	~160 Hz	Up to 500 Hz
<b>Interface</b>	I <sup>2</sup> C	I <sup>2</sup> C	RS-232 / USB
<b>Weight</b>	~2.5 g	~1.9 g	~16.5 g
<b>Voltages</b>	~2.375 V – 3.46 V	~2.16 V – 3.6 V	~500 mW (Power Supply Specifications)
<b>Output Data</b>	Acceleration, angular velocity	Magnetic field vector	Orientation (Euler angles, quaternion), acceleration, rate, and magnetic field
<b>Function in Experiment</b>	Measures roll and pitch motion	Provides heading (yaw) reference	Used as ground-truth reference for motion validation

MPU-6050 dan HMC5883L dengan membandingkannya terhadap sensor acuan 3DM-GX5-25. Prosedur ini mencakup pengukuran perpindahan sudut pada sumbu roll, pitch, dan yaw menggunakan protractor sebagai referensi, kemudian menghitung deviasi hasil pengukuran untuk setiap sudut uji.

*Proses kalibrasi dilaksanakan pada dua kondisi pengujian sebagai berikut:*

Kondisi statis, di mana modul sensor dan sensor acuan 3DM-GX5-25 dipasang secara bersamaan dan diputar secara manual menggunakan busur derajat/mechanical protractor untuk memberikan

perpindahan sudut yang telah diketahui. Konfigurasi ini memungkinkan penentuan faktor koreksi serta penyusunan persamaan regresi linier untuk masing-masing sumbu.

Kondisi dinamis, yang dilakukan menggunakan meja osilasi yang dirancang untuk menghasilkan gerak sudut secara periodik dan terkontrol. Konfigurasi ini digunakan untuk memvalidasi respons sensor secara real time serta kestabilan sensor yang telah dikalibrasi selama berlangsungnya gerakan osilasi.

*Kalibrasi Roll*

Modul sensor diputar terhadap sumbu x, dengan sumbu y berfungsi sebagai

lengan rotasi. Peningkatan sudut sebesar 3° diterapkan secara bertahap dari 0° hingga 30° menggunakan mechanical protractor sebagai acuan. Roll positif didefinisikan sebagai rotasi ke bawah dari arah sumbu y positif

### Kalibrasi Pitch

Sensor diputar terhadap sumbu y, dengan sumbu x digunakan sebagai lengan rotasi. Sudut pitch divariasikan dari 0° hingga 30° dengan interval 3°. Pitch positif didefinisikan sebagai rotasi ke atas dari arah sumbu x.

### Kalibrasi Yaw

Sensor diputar secara simultan terhadap sumbu x dan y relatif terhadap sumbu z. Sudut yaw diterapkan dari 0° hingga 20° dengan interval 2°. Yaw positif didefinisikan sebagai rotasi searah jarum jam jika diamati dari arah atas.

Analisis data difokuskan pada perbandingan luaran gerakan rotasi dari sistem yang dikembangkan dengan hasil pengukuran dari sensor acuan (3DM-GX5-25). Persentase



Gambar 3 Pengaturan kalibrasi statis: Roll (kiri), Pitch (tengah) dan Yaw (kanan)

Figure 3 Static calibration settings: Roll (left), Pitch (center) and Yaw (right)

kesalahan untuk setiap komponen gerak dihitung menggunakan Persamaan (1):

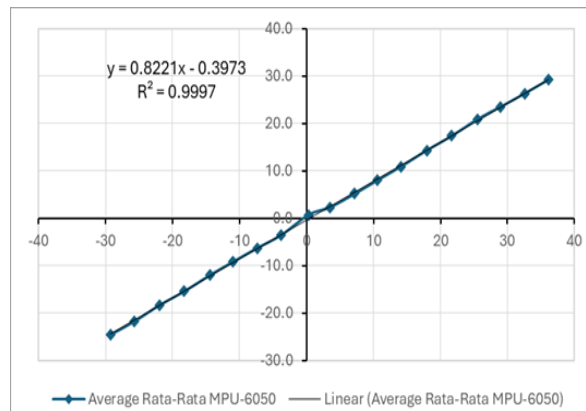
dimana  $S_m$  dan  $S_r$  masing-masing mereferensikan dan  $\text{Error} (\%) = \left| \frac{S_m - S_r}{S_r} \right| \times 100$  akan untuk mengembangkan sistem yang dikembangkan dan sensor 3DM-GX5-25, dengan koefisien determinasi ( $R^2$ ) sebagai indikator tingkat konsistensi linier.

## Hasil dan Pembahasan

### Hasil Kalibrasi Statis

Modul diputar terhadap sumbu x (roll) dengan kenaikan sudut 3° pada rentang -24° hingga +30°, di mana setiap sudut diverifikasi menggunakan protractor. Pada setiap posisi dilakukan dua kali pengukuran untuk mengevaluasi pengulangan. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa sensor 3DM-GX5-25 memiliki nilai kesalahan rata-rata sebesar 6,18%, sedangkan data awal MPU-6050 menunjukkan deviasi sebesar 20,76% terhadap nilai acuan. Analisis regresi linier antara sensor MEMS dan sensor acuan (Gambar 4) menghasilkan hubungan sebagai berikut:

$$y = 0.8221x - 0.3973, R^2 = 0.9997$$



Gambar 4 Analisis regresi linier antara sensor MEMS dan sensor acuan pada gerakan roll

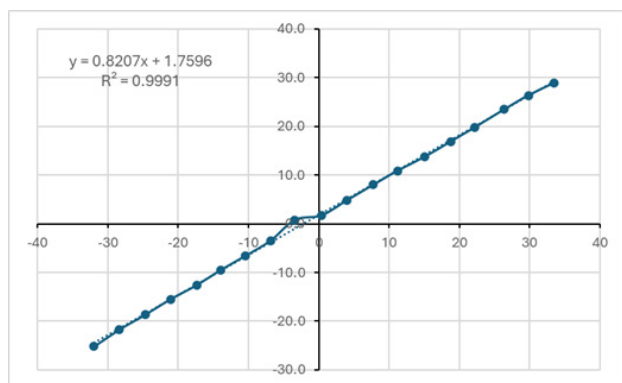
Figure 4 Linear regression analysis between MPU-6050 and reference sensor on roll motion

Sebagai persamaan, hasil kalibrasi ini diterapkan pada program nilai kesalahan rata-rata roll mengalami penurunan yang signifikan dari 20,43% menjadi 2,48% yang menunjukkan peningkatan akurasi pengukuran secara signifikan. Deviasi residual yang masih tersisa terutama disebabkan oleh noise sensor dalam skala kecil serta keterbatasan akurasi penyelarasan protractor.

Kalibrasi gerak pitch dilakukan dengan menerapkan kenaikan sudut sebesar 3° pada rentang -24° hingga +30°,

dengan 3DM-GX5-25 digunakan sebagai sensor acuan. Analisis regresi antara MPU-6050 dan sensor acuan (Gambar 5) menghasilkan hubungan sebagai berikut:  
 $y=0.8207x+1.7596, R^2=0.9991$

Koefisien determinasi menunjukkan adanya hubungan linier yang kuat. Setelah persamaan kalibrasi diterapkan pada program pemancar, nilai kesalahan rata-rata menurun dari 40,59% menjadi 15,96%,



Gambar 5 Analisis regresi linier antara sensor MEMS dan sensor acuan pada gerakan pitch  
 Figure 4 Linear regression analysis between MEMS sensor and reference sensor on roll motion

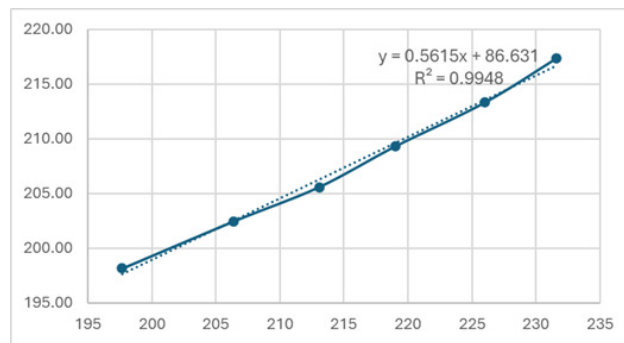
yang mengindikasikan peningkatan akurasi pengukuran yang signifikan

Kalibrasi yaw juga dilakukan dengan membandingkan keluaran sensor MPU-6050 dan HMC5883L terhadap sensor referensi 3DM-GX5-25. Analisis regresi (Gambar 6) menghasilkan persamaan sebagai berikut:

$$y=0.5615x+86.631, R^2=0.9948$$

Grafik tersebut menunjukkan adanya hubungan linier yang kuat antara sensor berbiaya rendah dan instrumen acuan. Nilai koefisien determinasi yang tinggi ( $R^2=0,9948$ ) mengindikasikan bahwa sekitar 99,48% variasi pengukuran yaw dapat dijelaskan oleh model linier yang diperoleh.

Setelah faktor koreksi ini diimplementasikan ke dalam program pemancar, nilai kesalahan rata-rata pengukuran yaw menurun dari 229,00% menjadi 88,08%, yang menunjukkan adanya peningkatan



Gambar 6 Analisis regresi linier antara sensor MEMS dan sensor acuan pada gerakan yaw  
 Figure 6 Linear regression analysis between MEMS sensor and reference sensor on yaw motion

akurasi yang signifikan. Namun demikian, tingkat kesalahan yang masih relatif besar mengindikasikan adanya keterbatasan akurasi pada estimasi yaw, yang terutama berkaitan dengan penggunaan magnetometer sebagai acuan heading terhadap true north, serta sensitivitasnya terhadap gangguan medan magnet dan kondisi lingkungan. Oleh karena itu, meskipun modul terintegrasi MPU-6050 + HMC5883L menunjukkan potensi dalam estimasi yaw setelah dikalibrasi, hasil ini juga menegaskan perlunya pengembangan lebih lanjut untuk meningkatkan keandalan pengukuran yaw pada aplikasi seakeeping.

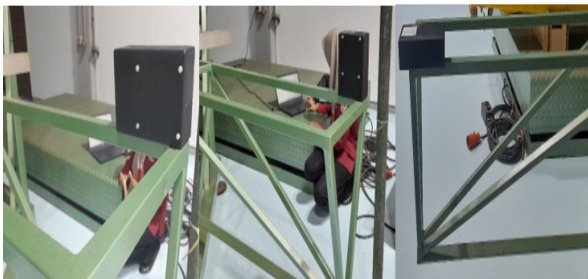
*Hasil Validasi Dinamis*

Validasi dinamis dilakukan untuk mengevaluasi kinerja real time dari sistem pengukuran gerakan berbasis IMU yang diusulkan pada kondisi osilasi terkontrol. Meja osilasi digunakan untuk menghasilkan gerak sudut harmonik yang merepresentasikan sumbu roll, pitch, dan yaw. Konfigurasi ini memungkinkan penilaian kemampuan sensor dalam menangkap dinamika rotasi yang merepresentasikan gerak kapal.

Selama pengujian, modul IMU yang terdiri atas accelerometer-gyroscope MPU-6050 dan magnetometer HMC5883L dipasang pada meja osilasi. Sumbu sensor (x, y, z) disejajarkan secara presisi dengan arah gerak meja osilasi untuk memastikan korespondensi arah yang konsisten antara sinyal yang diinduksi

dan sinyal terukur, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 7. Meja osilasi dioperasikan pada eksitasi harmonik beramplitudo rendah di sekitar frekuensi resonansinya untuk mempertahankan gerakan osilasi yang stabil.

Data yang diperoleh dari gyroscope dan magnetometer dianalisis untuk menilai kestabilan sinyal, korelasi amplitudo, dan kesesuaian fasa terhadap gerak masukan. Validasi ini bertujuan untuk memverifikasi



Gambar 7 Pengaturan validasi dinamis menggunakan meja osilasi: Roll (kiri), Pitch (tengah) dan Yaw (kanan)

*Figure 7 Dynamic validation setup using oscillation table: Roll (left), Pitch (center) and Yaw*

respons sensor pada perpindahan sudut yang berubah terhadap waktu serta menilai kesesuaiannya dalam menangkap perilaku rotasi dinamis pada studi seakeeping. Keluaran yang diamati menunjukkan respons yang koheren dan berulang pada seluruh sumbu yang diuji, yang mengindikasikan bahwa sistem IMU yang dikembangkan mampu mendeteksi osilasi beramplitudo kecil dan variasi sudut yang menyerupai kondisi struktur terapung di bawah pengaruh gelombang.

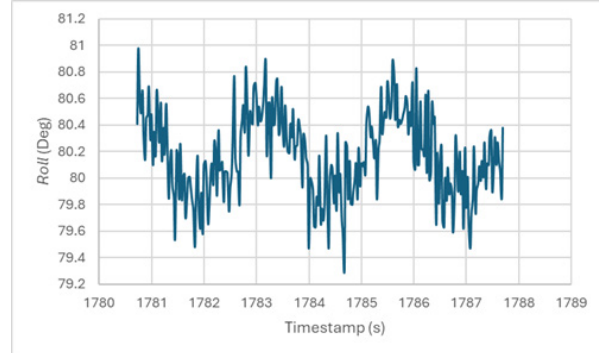
Analisis lanjutan terhadap data rekaman dilakukan untuk mengevaluasi kestabilan sinyal, keseragaman amplitudo, dan koherensi fasa terhadap gerak sudut terinduksi. Hasilnya menunjukkan respons yang konsisten dan repeatable pada seluruh sumbu pengujian.

Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 8, gerak roll berosilasi secara periodik pada kisaran sekitar  $79,2^\circ$  hingga  $81,2^\circ$  dengan nilai rata-rata mendekati  $80,3^\circ$ , yang menunjukkan ketelitian deteksi sudut yang baik. Respons pitch (Gambar 9)

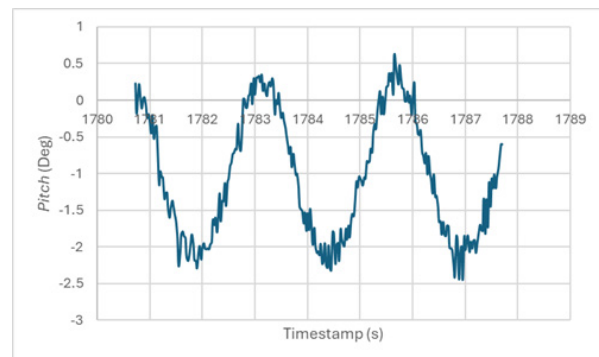
memperlihatkan osilasi pada rentang  $-2,5^\circ$  hingga  $0,7^\circ$  dengan amplitudo yang stabil. Sementara itu, gerak yaw (Gambar 10) menunjukkan osilasi yang stabil pada kisaran  $211^\circ$  hingga  $215,5^\circ$ , yang mengindikasikan kestabilan arah selama pengujian dinamis.

### *Sistem Akuisisi dan Visualisasi Data Real-Time*

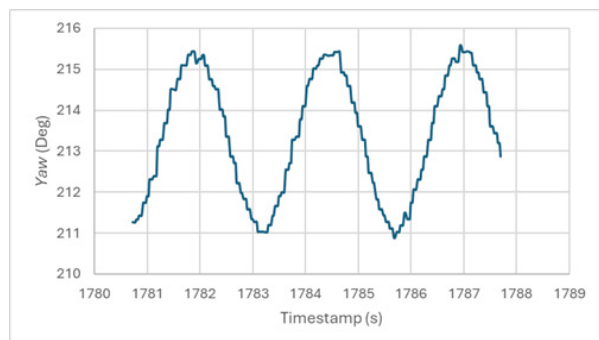
Program antarmuka berbasis Python dikembangkan untuk melakukan akuisisi dan visualisasi data IMU secara real time.



Gambar 8 Gerakan osilasi Roll  
*Figure 8 Oscillatory motion of the roll*



Gambar 9 Gerakan osilasi Pitch  
*Figure 9 Pitch oscillatory motion*



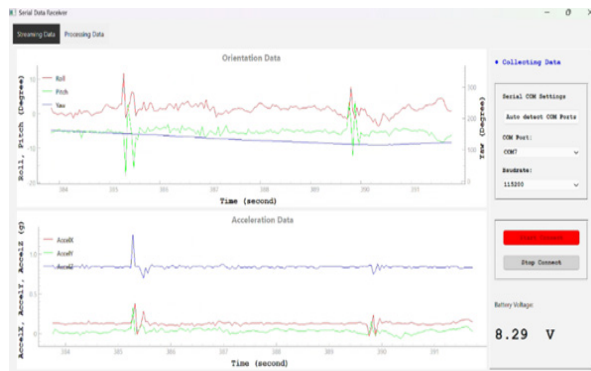
Gambar 10 Gerakan osilasi Yaw  
*Figure 10 Yaw oscillation motion*

sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 11. Sistem ini melakukan streaming data serial dari sensor MPU-6050 dan HMC5883L dengan baud rate 115200 bps, serta mendeteksi koneksi COM port secara otomatis.

Antarmuka menampilkan dua panel yang tersinkronisasi, yaitu data gerakan rotasional (roll, pitch, yaw) dan data percepatan (x, y, z). Konfigurasi ini memungkinkan pengamatan simultan terhadap respons gerak sudut dan percepatan linier selama pengujian dinamis. Selain itu, tersedia tombol kontrol untuk memulai dan menghentikan proses akuisisi data, sementara fitur monitor tegangan digunakan untuk memastikan kestabilan kerja sensor selama pengukuran.

## KESIMPULAN

Penelitian ini mengembangkan sistem pengukuran gerak rotasi berbiaya rendah berbasis sensor MEMS, yaitu accelerometer-gyroscope MPU-6050 dan magnetometer



Gambar 11 Visualisasi data gerak rotasi (roll, pitch, yaw) dan percepatan berbasis Python  
*Figure 11 Python-based visualization of rotational motion (roll, pitch, yaw) and acceleration data*

HMC5883L, yang dikalibrasi dan divalidasi terhadap sensor acuan berpresisi tinggi 3DM-GX5-25 pada kondisi statis dan dinamis. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem yang diusulkan mampu memberikan pengukuran roll dan pitch yang konsisten dan stabil, sehingga layak digunakan untuk analisis hidrodinamika dan studi seakeeping. Pengukuran yaw mengalami peningkatan akurasi setelah proses kalibrasi, namun masih

menunjukkan tingkat kesalahan yang relatif lebih tinggi akibat keterbatasan magnetometer sebagai acuan heading terhadap true north serta sensitivitas terhadap gangguan medan magnet. Meskipun demikian, sistem ini tetap menawarkan alternatif yang andal dan ekonomis untuk monitoring gerak rotasi kapal, khususnya dalam evaluasi roll dan pitch, serta menjadi dasar bagi pengembangan lebih lanjut dalam meningkatkan akurasi pengukuran yaw pada aplikasi teknologi kelautan.

## Persantunan

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Laboratorium Hidrodinamika, Pusat Riset Teknologi Hidrodinamika BRIN, Surabaya atas dukungan fasilitas dan bantuan teknis selama penelitian.

## DAFTAR PUSTAKA

- Abankwa, N. O., Johnston, S. J., Scott, M., & Cox, S. J. (2015). Ship motion measurement using an inertial measurement unit. EPrints Southampton, University of Southampton.
- Abankwa, N. O., Johnston, S., Scott, M., & Cox, S. (2016). Ship motion measurement using an inertial measurement unit. In Proceedings of the 2015 IEEE 2nd World Forum on Internet of Things (WF-IoT) (pp. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/WF-IoT.2015.7389083>
- Abankwa, N. O., Squicciarini, G., Ossont, S. J., & Cox, S. J. (2016). An evaluation of the use of low-cost accelerometers in assessing fishing vessel stability through period of heave motion. ResearchGate.
- International Maritime Organization. (2008). International Code on Intact Stability (2008 IS Code) (Resolution MSC.267(85)). International Maritime Organization.
- LORD Sensing. (2024). 3DM-GX5-25 datasheet. MicroStrain / Mouser Electronics.
- LORD Sensing. (2024). 3DM®-GX5-25 user manual. Clearpath Robotics / MicroStrain.
- Yang, Y., Li, Y., Zhang, S., Liu, Z., & Zhou, J. (2024). Emerging MEMS sensors

for ocean physics: Principles, challenges  
and applications. AIP Advances, 11(2).