



Department of Digital Business

Journal of Artificial Intelligence and Digital Business (RIGGS)

Homepage: <https://journal.ilmudata.co.id/index.php/RIGGS>

Vol. 5 No. 2 (2026) pp: 19224-19234

P-ISSN: 2963-9298, e-ISSN: 2963-914X

Estimasi Tinggi Gelombang *Smart Buoy* Berbasis IMU Menggunakan Madgwick dan Kalman Filter

Naufal A. Furqan, Muhammad Zulfikri, Rifqi Hammad, Bambang Krismono Triwijoyo, Husain
Universitas Bumigora, Mataram, Indonesia

naufal.furqan13@gmail.com, mzulfikri@universitasbumigora.ac.id, rifqi.hammad@universitasbumigora.ac.id,
bkrismono@universitasbumigora.ac.id, husain@universitasbumigora.ac.id

Abstrak

Pengukuran tinggi gelombang laut merupakan informasi penting untuk mendukung keselamatan pelayaran, aktivitas perikanan, dan pemantauan kondisi oseanografi. Namun, perangkat pengukuran gelombang komersial umumnya memiliki biaya yang tinggi sehingga penggunaannya masih terbatas. Penelitian ini bertujuan mengembangkan *smart buoy* berbasis Inertial Measurement Unit (IMU) untuk mengestimasi tinggi gelombang laut secara real-time menggunakan kombinasi Madgwick Filter dan Kalman Filter. Sistem dikembangkan menggunakan mikrokontroler ESP32, sensor MPU6050, dan komunikasi LoRa untuk mengirimkan data ke Google Sheets yang kemudian divisualisasikan melalui Google Looker Studio. Data akselerometer dan giroskop diproses menggunakan Madgwick Filter untuk memperoleh estimasi orientasi, dilanjutkan dengan kompensasi gravitasi, integrasi numerik untuk memperoleh sinyal heave, serta penyaringan menggunakan Kalman Filter sebelum menghitung Significant Wave Height (Hs). Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu melakukan akuisisi, pemrosesan, pengiriman, dan visualisasi data secara real-time. Hasil estimasi Hs memiliki kesesuaian yang tinggi terhadap data referensi dengan nilai RMSE sebesar 0,0135 m, MAE sebesar 0,0116 m, MAPE sebesar 4,19%, akurasi sebesar 95,81%, dan koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,9918. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kombinasi Madgwick Filter dan Kalman Filter mampu menghasilkan estimasi tinggi gelombang yang akurat, sehingga *smart buoy* yang dikembangkan berpotensi menjadi alternatif sistem pemantauan gelombang laut yang sederhana, berbiaya relatif rendah, dan mudah diimplementasikan.

Kata kunci: *Smart Buoy*, IMU, Hs, Madgwick Filter, Kalman Filter, Significant Wave Height.

1. Latar Belakang

Pemantauan tinggi gelombang laut merupakan salah satu komponen penting dalam mendukung keselamatan pelayaran, aktivitas perikanan, operasi lepas pantai, serta mitigasi bencana. Informasi kondisi gelombang yang akurat dan tersedia secara real-time diperlukan sebagai dasar pengambilan keputusan pada berbagai aktivitas maritim. Berbagai teknologi telah dikembangkan untuk melakukan pengukuran gelombang, seperti *wave rider buoy*, sensor tekanan, radar gelombang, dan penginderaan jauh berbasis satelit. Meskipun mampu menghasilkan data dengan akurasi tinggi, sebagian besar sistem tersebut masih memiliki biaya pengadaan dan pemeliharaan yang relatif mahal sehingga penerapannya belum dapat dilakukan secara luas, terutama pada kegiatan penelitian dan pemantauan di wilayah dengan keterbatasan sumber daya [1]–[3].

Perkembangan sensor *Micro-Electro-Mechanical System* (MEMS) mendorong lahirnya berbagai penelitian mengenai *smart buoy* berbiaya rendah sebagai alternatif perangkat pemantauan gelombang laut. Beberapa penelitian telah berhasil mengembangkan *smart buoy* berbasis IMU dengan memanfaatkan data akselerometer dan giroskop untuk mengestimasi karakteristik gelombang laut, baik melalui pengujian laboratorium maupun pengujian lapangan [4]–[8]. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa sensor IMU memiliki potensi sebagai solusi pengukuran gelombang yang lebih ekonomis, namun tingkat akurasi sistem sangat dipengaruhi oleh kualitas proses pengolahan sinyal yang diterapkan pada perangkat *embedded*.

Pada sistem *smart buoy* berbasis IMU, data percepatan yang diperoleh sensor tidak hanya merepresentasikan gerakan naik-turun pelampung (*heave*), tetapi juga dipengaruhi oleh perubahan orientasi akibat kemiringan pelampung, percepatan gravitasi, serta *noise* yang berasal dari karakteristik sensor MEMS. Selain itu, proses integrasi percepatan untuk memperoleh perpindahan vertikal dapat menyebabkan akumulasi *drift* yang semakin

besar seiring bertambahnya waktu pengukuran. Berbagai penelitian telah memanfaatkan Madgwick Filter untuk meningkatkan akurasi estimasi orientasi sensor dan Kalman Filter untuk mereduksi *noise* hasil pengukuran [9]–[12]. Meskipun demikian, sebagian besar penelitian masih mengevaluasi kedua metode tersebut secara terpisah atau hanya berfokus pada salah satu tahapan pemrosesan sinyal.

Berdasarkan kondisi tersebut, masih terdapat kebutuhan akan sistem *smart buoy* berbiaya rendah yang mampu mengintegrasikan seluruh tahapan pemrosesan sinyal IMU secara berkesinambungan, mulai dari estimasi orientasi, kompensasi gravitasi, integrasi numerik, hingga reduksi *noise* pada sistem *embedded*. Selain itu, penelitian yang memvalidasi keseluruhan proses tersebut melalui pengujian laboratorium dan pengujian lapangan menggunakan parameter evaluasi yang komprehensif masih relatif terbatas [4]–[17]. Kesenjangan tersebut menunjukkan bahwa stabilitas estimasi tinggi gelombang tidak hanya ditentukan oleh pemilihan algoritma, tetapi juga oleh bagaimana setiap tahapan pemrosesan sinyal dirancang dan diintegrasikan menjadi satu sistem yang utuh.

Berdasarkan *research gap* tersebut, penelitian ini mengembangkan *smart buoy* berbasis IMU untuk estimasi tinggi gelombang dengan mengintegrasikan Madgwick Filter sebagai metode estimasi orientasi dan kompensasi gravitasi serta Kalman Filter sebagai metode reduksi *noise* pada hasil estimasi gerakan vertikal. Selain itu, penelitian ini menerapkan mekanisme stabilisasi numerik pada sistem *embedded* untuk meminimalkan pengaruh *drift* selama proses integrasi percepatan menjadi perpindahan vertikal. Kinerja sistem dievaluasi melalui pengujian laboratorium dan pengujian lapangan menggunakan parameter *Root Mean Square Error* (RMSE), *Mean Absolute Error* (MAE), *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE), koefisien determinasi (R^2), dan tingkat akurasi terhadap data pengukuran referensi. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi alternatif sistem pemantauan gelombang laut berbiaya rendah yang memiliki stabilitas dan akurasi yang baik untuk mendukung berbagai kebutuhan pemantauan di lingkungan maritim.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimen yang bertujuan mengembangkan dan mengevaluasi sistem *smart buoy* berbasis *Inertial Measurement Unit* (IMU) untuk mengestimasi tinggi gelombang laut. Penelitian dilaksanakan melalui tahapan perancangan perangkat keras, pengembangan perangkat lunak *embedded*, implementasi algoritma pemrosesan sinyal, serta pengujian laboratorium dan pengujian lapangan. Metode estimasi orientasi menggunakan Madgwick Filter mengacu pada penelitian Madgwick [9], sedangkan proses reduksi *noise* menggunakan Kalman Filter mengacu pada metode yang telah banyak digunakan pada sistem navigasi dan pengolahan sinyal sensor [10]–[12].

2.1. Desain Penelitian

Tahapan penelitian diawali dengan integrasi seluruh perangkat keras *smart buoy* yang terdiri atas sensor IMU, mikrokontroler ESP32-S3, modul komunikasi LoRa, media penyimpanan data, dan sistem catu daya. Selanjutnya dilakukan kalibrasi sensor untuk mengurangi kesalahan pembacaan awal sebelum proses akuisisi data. Data akselerometer dan giroskop yang diperoleh kemudian diproses menggunakan Madgwick Filter untuk mengestimasi orientasi sensor dalam bentuk *quaternion* [9], kemudian dilakukan kompensasi gravitasi untuk memperoleh percepatan vertikal. Percepatan tersebut diintegrasikan secara numerik menjadi kecepatan dan perpindahan *heave*. Untuk mengurangi pengaruh *drift* akibat integrasi numerik, sistem menerapkan mekanisme stabilisasi berupa *deadband*, *damping*, pembatas kecepatan, dan pembatas perpindahan sebelum dilakukan penyaringan menggunakan Kalman Filter [11], [12]. Nilai *heave* hasil penyaringan selanjutnya digunakan untuk menghitung *Significant Wave Height* (Hs).

Kinerja sistem dievaluasi melalui pengujian laboratorium dan pengujian lapangan dengan membandingkan hasil estimasi *smart buoy* terhadap data pengukuran referensi. Evaluasi dilakukan menggunakan parameter *Root Mean Square Error* (RMSE), *Mean Absolute Error* (MAE), *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE), koefisien determinasi (R^2), dan tingkat akurasi untuk mengetahui performa sistem dalam mengestimasi tinggi gelombang.

2.2. Arsitektur Smart Buoy

Arsitektur sistem yang dikembangkan terdiri atas dua bagian utama, yaitu unit *smart buoy* sebagai perangkat akuisisi data dan stasiun pemantauan sebagai penerima serta visualisasi data. Unit *smart buoy* menggunakan

mikrokontroler ESP32-S3 sebagai pengendali utama, sensor MPU6050 pada modul GY-87 sebagai sumber data akselerometer dan giroskop, serta modul komunikasi LoRa sebagai media transmisi data nirkabel. ESP32-S3 bertugas melakukan akuisisi data sensor, menjalankan algoritma pemrosesan sinyal secara *real-time*, menghitung parameter tinggi gelombang, kemudian mengirimkan hasil pengukuran melalui jaringan LoRa [9]–[15].

Data yang diterima oleh stasiun penerima (*gateway*) selanjutnya diteruskan ke Google Sheets sebagai media penyimpanan berbasis *cloud*. Data tersebut kemudian divisualisasikan menggunakan Data Studio sehingga kondisi gelombang dapat dipantau secara *real-time* melalui antarmuka berbasis web. Arsitektur ini memungkinkan proses pemantauan dilakukan dari lokasi yang berbeda tanpa memerlukan penyimpanan data secara lokal pada *smart buoy*.

2.3. Akuisisi Data IMU

Akuisisi data dilakukan menggunakan sensor MPU6050 yang terintegrasi pada modul GY-87. Sensor ini menghasilkan data percepatan *accelerometer* yang terdiri atas sumbu X (A_x), Y (A_y), dan Z (A_z) serta data kecepatan *gyroscope* yang terdiri atas G_x , G_y , dan G_z . Data dari kedua sensor tersebut digunakan sebagai masukan utama dalam proses estimasi orientasi dan perhitungan gerakan vertikal *smart buoy* [7], [8].

Proses akuisisi dilakukan secara periodik dengan frekuensi 100 Hz atau interval pengambilan data sebesar 0,01 detik ($\Delta t = 0,01$ s). Frekuensi tersebut dipilih untuk memperoleh resolusi temporal yang memadai dalam merekam perubahan gerakan pelampung akibat gelombang laut, sekaligus tetap sesuai dengan kemampuan pemrosesan mikrokontroler ESP32-S3. Sebelum digunakan dalam proses estimasi, data akselerometer dan giroskop dikalibrasi untuk mengurangi kesalahan *bias* dan *offset* sensor sehingga pembacaan lebih stabil.

2.4. Pipeline Pemrosesan Sinyal

Data akselerometer dan giroskop yang diperoleh dari sensor MPU6050 yang diproses secara berurutan untuk menghasilkan estimasi tinggi gelombang. Tahapan pemrosesan meliputi estimasi orientasi, kompensasi gravitasi, integrasi numerik, stabilisasi sinyal, penyaringan menggunakan Kalman Filter, dan perhitungan tinggi gelombang signifikan (*Significant Wave Height*). Alur pemrosesan tersebut ditunjukkan pada Gambar 3.

Estimasi orientasi dilakukan menggunakan Madgwick Filter yang menggabungkan data akselerometer dan giroskop untuk memperoleh orientasi sensor dalam bentuk *quaternion* [9], [10]. *Quaternion* yang dihasilkan dinyatakan sebagai

$$\mathbf{q} = [q_0 \quad q_1 \quad q_2 \quad q_3] \quad (1)$$

q_0 menyatakan komponen skalar, sedangkan q_1 , q_2 , dan q_3 merupakan komponen vektor *quaternion*. Estimasi *quaternion* digunakan untuk menentukan orientasi pelampung terhadap sistem koordinat bumi sehingga pengaruh perubahan kemiringan dapat dikompensasi sebelum dilakukan perhitungan percepatan vertikal.

Percepatan yang diukur oleh akselerometer merupakan kombinasi antara percepatan akibat gerakan pelampung dan percepatan gravitasi. Oleh karena itu, dilakukan kompensasi gravitasi menggunakan hasil estimasi orientasi sehingga diperoleh *heave acceleration* murni. Proses ini dilakukan dengan mentransformasikan vektor percepatan dari koordinat sensor ke koordinat global menggunakan *quaternion* hasil estimasi orientasi [9].

Percepatan vertikal selanjutnya dihitung sebagai

$$a_h = a_z - g \quad (2)$$

a_h merupakan percepatan vertikal (m/s^2), a_z adalah percepatan pada sumbu vertikal setelah transformasi koordinat (m/s^2), dan g adalah percepatan gravitasi ($9,81 m/s^2$).

Percepatan vertikal diintegrasikan secara numerik untuk memperoleh kecepatan vertikal, kemudian diintegrasikan kembali menjadi perpindahan *heave*. Persamaan integrasi yang digunakan adalah

$$v_t = v_{(t-1)} + a_h \Delta t \quad (3)$$

$$h_t = h_{(t-1)} + v_t \Delta t \quad (4)$$

v_t merupakan kecepatan vertikal pada waktu ke-(t) (m/s), h_t adalah perpindahan *heave* pada waktu ke-(t) (m), a_h adalah percepatan vertikal (m/s²), dan Δt adalah interval pengambilan data (0,01 s).

Karena proses integrasi numerik rentan menghasilkan akumulasi *drift*, hasil integrasi selanjutnya distabilkan melalui mekanisme pengolahan sinyal yang diimplementasikan pada perangkat *embedded*.

Tahap pertama adalah penerapan *deadband*, yaitu mengabaikan perubahan nilai perpindahan yang berada di bawah ambang batas tertentu. Mekanisme ini bertujuan mengurangi pengaruh fluktuasi kecil yang tidak merepresentasikan gerakan gelombang sebenarnya sehingga osilasi akibat *noise* dapat diminimalkan.

Tahap berikutnya adalah *damping*, yaitu pemberian faktor peredaman terhadap perubahan nilai perpindahan hasil integrasi. *Damping* diterapkan untuk mengurangi pertumbuhan amplitudo akibat akumulasi kesalahan numerik sehingga estimasi gerakan vertikal tetap berada pada kondisi yang stabil selama proses pengukuran berlangsung.

Selain itu, sistem juga menerapkan *velocity limiter* dan *position limiter* untuk membatasi nilai kecepatan serta perpindahan vertikal agar tetap berada pada rentang operasional yang realistis. Pembatasan tersebut berfungsi sebagai mekanisme proteksi terhadap nilai ekstrem yang dapat muncul akibat kesalahan integrasi maupun gangguan sesaat pada pembacaan sensor.

Setelah melalui tahapan stabilisasi numerik, sinyal *heave* diproses menggunakan Kalman Filter untuk mereduksi *noise* sekaligus menghasilkan estimasi perpindahan vertikal yang lebih halus. Pada penelitian ini digunakan model Kalman Filter diskrit yang terdiri atas tahap *prediction* dan *update* [11], [12].

Tahap prediksi dinyatakan sebagai

$$\hat{x}_k^- = A\hat{x}_{k-1} + Bu_k \quad (5)$$

$$P_k^- = AP_{k-1}A^T + Q \quad (6)$$

Selanjutnya, tahap koreksi dilakukan menggunakan

$$K_k = P_k^- H^T (HP_k^- H^T + R)^{-1} \quad (7)$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k(z_k - H\hat{x}_k^-) \quad (8)$$

$$P_k = (I - K_k H)P_k^- \quad (9)$$

$\hat{x}_k^-$ adalah estimasi keadaan pada waktu ke-(k), P_k adalah kovarians galat estimasi, Q adalah kovarians noise proses, R adalah kovarians *noise* pengukuran, K_k adalah Kalman *Gain*, z_k adalah data hasil pengukuran, dan A , B , dan H adalah matriks model sistem. Keluaran Kalman Filter berupa sinyal *heave* yang telah direduksi dari pengaruh *noise* frekuensi tinggi. Sinyal tersebut selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam proses estimasi *Significant Wave Height*.

2.5. Estimasi *Significant Wave Height* (Hs)

Keluaran utama dari *pipeline* pemrosesan sinyal adalah perpindahan *heave* yang telah melalui proses estimasi orientasi, kompensasi gravitasi, integrasi numerik, stabilisasi sinyal, dan penyaringan menggunakan Kalman Filter. Nilai *heave* tersebut digunakan sebagai dasar dalam perhitungan Hs.

Perhitungan Hs dilakukan menggunakan metode statistik yang didasarkan pada nilai rata-rata *highest one-third waves*. Metode ini merupakan pendekatan yang umum digunakan dalam oseanografi karena mampu merepresentasikan kondisi gelombang yang diamati secara visual maupun instrumental [15], [16].

Tahapan perhitungan H_s diawali dengan mengidentifikasi *crest* dan *trough* pada sinyal *heave* hasil penyaringan. Selanjutnya dihitung tinggi setiap gelombang sebagai selisih antara nilai puncak dan lembah yang berurutan,

$$H_i = C_i - T_i \quad (10)$$

H_i merupakan tinggi gelombang ke-(i) (m), C_i merupakan nilai puncak gelombang (m), dan T_i merupakan nilai lembah gelombang (m).

Seluruh tinggi gelombang kemudian diurutkan dari nilai terbesar hingga terkecil. Nilai H_s diperoleh dari rata-rata sepertiga tinggi gelombang terbesar yang dihitung menggunakan

$$H_s = \frac{1}{N/3} \sum_{i=1}^{N/3} H_i \quad (11)$$

H_s merupakan *Significant Wave Height* (m), H_i merupakan tinggi gelombang hasil identifikasi *crest-trough* (m), dan N merupakan jumlah total gelombang yang teridentifikasi.

Nilai H_s yang diperoleh selanjutnya dikirimkan melalui modul komunikasi LoRa menuju stasiun penerima dan diteruskan ke Google Sheets untuk penyimpanan data. Seluruh data hasil pengukuran divisualisasikan secara *real-time* menggunakan Data Studio sehingga kondisi gelombang dapat dipantau melalui *dashboard* berbasis web.

2.6. Pengujian Sistem

Pengujian dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan sistem *smart buoy* dalam mengestimasi tinggi gelombang [17]. Pengujian dilaksanakan dalam tiga tahapan, yaitu pengujian sensor, pengujian laboratorium, dan pengujian lapangan.

Tahap pertama bertujuan memastikan sensor IMU berfungsi dengan baik setelah proses kalibrasi. Pada tahap ini diamati kestabilan pembacaan akselerometer dan giroskop sebagai masukan algoritma pemrosesan sinyal.

Tahap kedua merupakan pengujian laboratorium yang dilakukan pada lingkungan terkontrol untuk mengevaluasi kinerja *pipeline* pemrosesan sinyal sebelum sistem digunakan pada kondisi laut sebenarnya. Pengujian ini digunakan untuk memastikan bahwa estimasi orientasi, kompensasi gravitasi, integrasi numerik, serta Kalman Filter mampu menghasilkan sinyal *heave* yang stabil.

Tahap ketiga merupakan pengujian lapangan menggunakan prototipe *smart buoy* pada perairan terbuka. Data hasil estimasi sistem dibandingkan dengan data pengukuran referensi untuk mengetahui tingkat kesesuaian hasil estimasi tinggi gelombang. Seluruh data pengujian dikirim secara nirkabel menggunakan komunikasi LoRa menuju *gateway*, kemudian disimpan pada Google Sheets dan divisualisasikan menggunakan Data Studio sebagai media pemantauan secara *real-time*.

2.7. Evaluasi Kinerja

Evaluasi kinerja sistem dilakukan dengan membandingkan hasil estimasi tinggi gelombang dari *smart buoy* terhadap data pengukuran referensi. Tingkat kesesuaian hasil pengukuran dianalisis menggunakan lima parameter evaluasi, yaitu *Root Mean Square Error* (RMSE), *Mean Absolute Error* (MAE), *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE), koefisien determinasi (R^2), dan tingkat akurasi [18], [19].

Kelima parameter tersebut digunakan untuk menilai tingkat kesalahan, konsistensi, dan kesesuaian hasil estimasi sistem terhadap data referensi sehingga diperoleh gambaran menyeluruh mengenai performa *smart buoy* yang dikembangkan.

3. Hasil dan Diskusi

3.1. Implementasi *Smart Buoy*

Prototype smart buoy berhasil direalisasikan sesuai dengan rancangan sistem yang terdiri atas mikrokontroler ESP32-S3 sebagai pengendali utama, sensor MPU6050 pada modul GY-87 sebagai perangkat akuisisi data gerak, serta modul komunikasi LoRa untuk mengirimkan hasil pengukuran menuju stasiun penerima. Seluruh algoritma pemrosesan sinyal dijalankan secara *real-time* pada ESP32-S3 sehingga mampu menghasilkan estimasi tinggi gelombang secara otomatis. *Prototype smart buoy* yang telah direalisasikan ditunjukkan pada Gambar 1. Perangkat dirancang dalam bentuk pelampung yang mampu mengapung di permukaan air serta membawa seluruh komponen elektronik untuk melakukan akuisisi dan pemrosesan data secara mandiri.



Gambar 1. *Prototype smart buoy*

Data hasil pengukuran selanjutnya dikirim melalui komunikasi LoRa menuju *gateway* yang ditampilkan pada Gambar 2 dan diteruskan ke Google Sheets sebagai media penyimpanan berbasis *cloud*. Seluruh data kemudian divisualisasikan menggunakan Data Studio sehingga hasil pengukuran dapat dipantau secara *real-time*. Tampilan dashboard hasil monitoring ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 2. Unit *gateway*



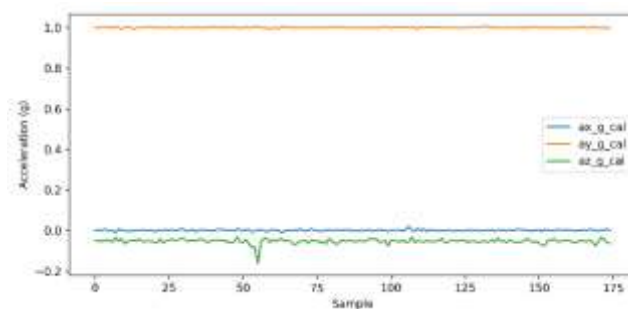
Gambar 3. Dashboard pemantauan

Berdasarkan hasil implementasi tersebut, seluruh komponen perangkat keras, komunikasi data, dan algoritma pemrosesan sinyal dapat bekerja secara terpadu. Sistem mampu melakukan akuisisi data IMU, menghitung estimasi tinggi gelombang, mengirimkan data melalui jaringan LoRa, serta menampilkan hasil pengukuran secara *real-time* pada dashboard pemantauan.

3.2. Hasil Akuisisi Data IMU

Tahap awal pengujian bertujuan untuk mengevaluasi hasil akuisisi data dari sensor MPU6050 yang menjadi masukan utama pada proses estimasi tinggi gelombang. Data yang direkam meliputi percepatan *accelerometer* dan kecepatan sudut *gyroscope* dengan frekuensi pengambilan sampel sebesar 100 Hz.

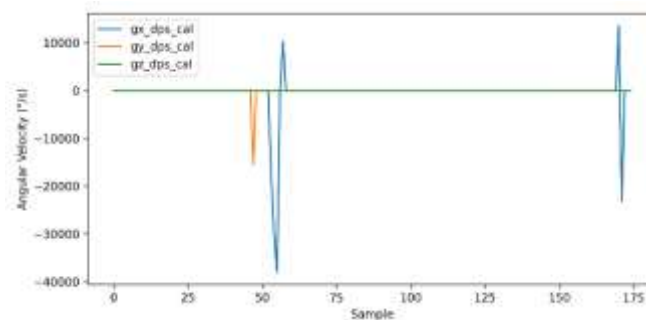
Hasil pembacaan sensor akselerometer selama pengujian ditunjukkan pada Gambar 4. Grafik memperlihatkan perubahan nilai percepatan pada sumbu X, Y, dan Z sebagai respons terhadap gerakan *smart buoy* akibat gelombang.



Gambar 4. Hasil akuisisi data akselerometer

Berdasarkan Gambar 4, sinyal akselerometer menunjukkan fluktuasi yang mengikuti dinamika gerakan pelampung selama pengujian. Nilai percepatan pada setiap sumbu mengalami perubahan yang berbeda sesuai dengan orientasi dan arah gerakan *smart buoy*. Meskipun pola perubahan telah mengikuti karakteristik gerakan gelombang, sinyal masih mengandung fluktuasi berfrekuensi tinggi yang merupakan karakteristik umum sensor MEMS. Oleh karena itu, data akselerometer belum dapat digunakan secara langsung untuk menghitung tinggi gelombang dan memerlukan proses estimasi orientasi serta kompensasi gravitasi.

Hasil pembacaan sensor giroskop ditunjukkan pada Gambar 5. Grafik memperlihatkan perubahan kecepatan sudut pada masing-masing sumbu selama proses pengukuran.

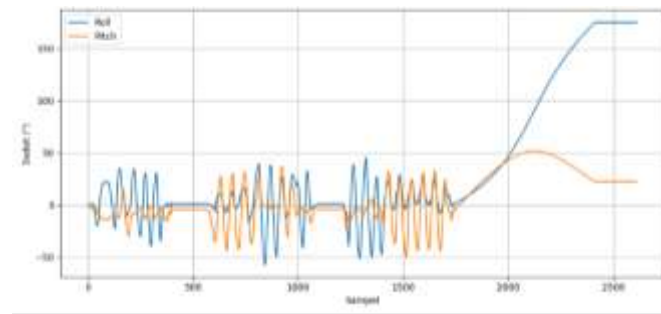


Gambar 5. Hasil akuisisi data *gyroscope*

Berdasarkan Gambar 5, data giroskop mampu merekam perubahan kecepatan sudut yang terjadi ketika *smart buoy* mengalami gerakan akibat gelombang. Perubahan tersebut digunakan bersama data akselerometer sebagai masukan pada Madgwick Filter untuk memperoleh estimasi orientasi sensor. Kombinasi kedua jenis data tersebut memungkinkan sistem menghasilkan estimasi orientasi yang lebih stabil dibandingkan apabila hanya menggunakan salah satu sensor saja.

3.3. Estimasi Orientasi dan *Heave*

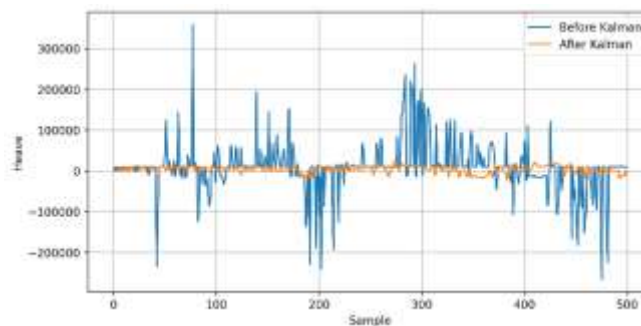
Setelah proses akuisisi data, sinyal akselerometer dan giroskop diproses menggunakan Madgwick Filter untuk memperoleh estimasi orientasi sensor dalam bentuk sudut *roll* dan *pitch*. Estimasi orientasi diperlukan untuk menghilangkan pengaruh kemiringan *smart buoy* sehingga percepatan vertikal yang digunakan pada proses selanjutnya hanya merepresentasikan gerakan akibat gelombang. Hasil estimasi orientasi ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Hasil estimasi orientasi *roll* dan *pitch*

Berdasarkan Gambar 6, nilai *roll* dan *pitch* berubah secara dinamis mengikuti gerakan *smart buoy* selama pengujian. Perubahan orientasi tersebut menunjukkan bahwa algoritma Madgwick Filter mampu mengombinasikan data akselerometer dan giroskop untuk menghasilkan estimasi orientasi yang stabil. Informasi orientasi ini selanjutnya digunakan pada proses kompensasi gravitasi sehingga pengaruh percepatan gravitasi dapat dipisahkan dari percepatan akibat gerakan gelombang.

Hasil kompensasi gravitasi dan integrasi numerik menghasilkan sinyal perpindahan *heave*. Sebelum dilakukan penyaringan, sinyal *heave* masih menunjukkan fluktuasi yang dipengaruhi oleh *noise* sensor dan akumulasi kesalahan integrasi. Oleh karena itu, sinyal diproses menggunakan mekanisme stabilisasi numerik dan Kalman Filter. Perbandingan sinyal *heave* sebelum dan sesudah penyaringan menggunakan Kalman Filter ditunjukkan pada Gambar 7.

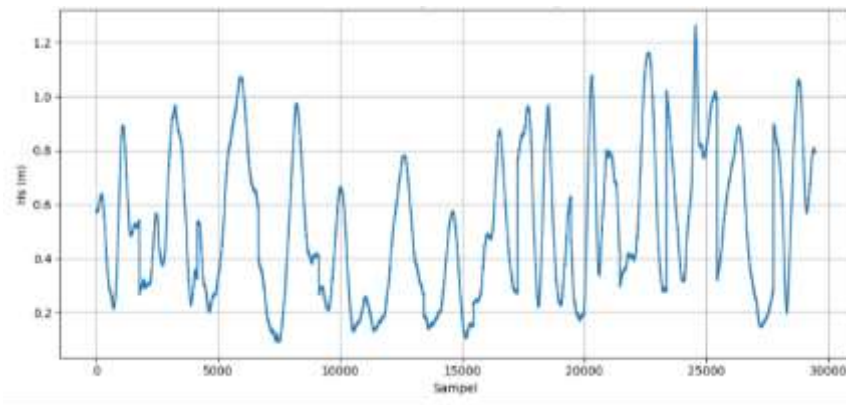


Gambar 7. Perbandingan sinyal *heave* sebelum dan setelah Kalman Filter

Berdasarkan Gambar 7, sinyal *heave* hasil Kalman Filter memiliki karakteristik yang lebih halus dibandingkan sinyal sebelum penyaringan. Fluktuasi berfrekuensi tinggi yang berasal dari *noise* sensor berhasil dikurangi tanpa menghilangkan pola utama gerakan gelombang. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kombinasi mekanisme stabilisasi numerik dan Kalman Filter mampu meningkatkan kualitas sinyal *heave* sehingga lebih representatif untuk digunakan dalam proses estimasi tinggi gelombang.

3.4. Estimasi Hs

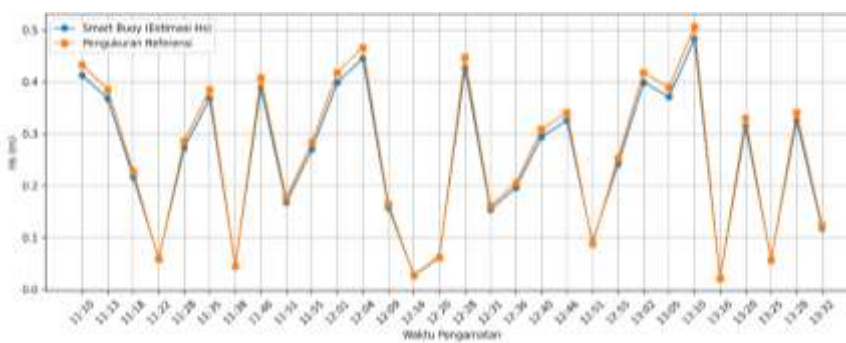
Hasil akhir dari *pipeline* pemrosesan sinyal adalah estimasi Hs yang diperoleh dari sinyal *heave* setelah melalui proses estimasi orientasi, kompensasi gravitasi, integrasi numerik, mekanisme stabilisasi, dan penyaringan menggunakan Kalman Filter. Nilai Hs digunakan sebagai parameter utama untuk merepresentasikan kondisi gelombang selama pengujian. Hasil estimasi Hs oleh *smart buoy* ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Hasil estimasi *Significant Wave Height* (H_s) menggunakan *smart buoy*

Berdasarkan Gambar 8, nilai H_s yang dihasilkan *smart buoy* menunjukkan perubahan yang mengikuti dinamika kondisi gelombang selama pengujian. Fluktuasi nilai H_s mencerminkan perubahan energi gelombang yang diterima oleh pelampung, sehingga sistem mampu merekam variasi tinggi gelombang secara kontinu selama proses pengamatan.

Untuk mengevaluasi tingkat kesesuaian hasil estimasi, nilai H_s dari *smart buoy* dibandingkan dengan hasil pengukuran referensi. Perbandingan kedua hasil pengukuran tersebut ditunjukkan pada Gambar 9.



Gambar 9. Perbandingan H_s hasil estimasi *smart buoy* dengan pengukuran referensi

Berdasarkan Gambar 9, pola perubahan H_s yang dihasilkan *smart buoy* memiliki kecenderungan yang serupa dengan data referensi. Pada sebagian besar titik pengamatan, kedua kurva menunjukkan tren kenaikan dan penurunan yang konsisten. Perbedaan nilai pada beberapa titik pengamatan diperkirakan dipengaruhi oleh karakteristik sensor IMU, akumulasi kesalahan integrasi, serta gangguan lingkungan selama proses pengujian. Meskipun demikian, hasil estimasi masih mampu mengikuti pola perubahan gelombang secara umum sehingga menunjukkan bahwa *pipeline* pemrosesan sinyal yang diterapkan pada *smart buoy* bekerja dengan baik.

Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa kombinasi Madgwick Filter dan Kalman Filter mampu menghasilkan estimasi tinggi gelombang yang mendekati hasil pengukuran referensi. Temuan ini mengindikasikan bahwa pendekatan yang diusulkan layak digunakan sebagai alternatif pemantauan tinggi gelombang berbasis sensor IMU pada platform *smart buoy* berbiaya rendah.

3.5. Evaluasi Kinerja Sistem

Evaluasi kinerja dilakukan untuk mengetahui tingkat kesesuaian hasil estimasi H_s yang dihasilkan oleh *smart buoy* terhadap data pengukuran referensi. Analisis dilakukan menggunakan lima parameter evaluasi, yaitu *Root Mean Square Error* (RMSE), *Mean Absolute Error* (MAE), *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE), tingkat akurasi, dan koefisien determinasi (R^2). Hasil evaluasi disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil evaluasi kinerja *smart buoy* terhadap data referensi

Parameter	Rentang	Nilai
RMSE (m)	m	0,0135
MAE (m)	m	0,0116
MAPE (%)	%	4,19
Akurasi (%)	%	95,81
R ²	²	0,9918

Berdasarkan Tabel 1, nilai RMSE menunjukkan bahwa selisih antara hasil estimasi *smart buoy* dan data referensi berada pada tingkat yang relatif kecil sehingga sistem mampu mengikuti perubahan tinggi gelombang dengan baik. Nilai MAE yang rendah menunjukkan bahwa rata-rata kesalahan absolut hasil estimasi tetap berada dalam batas yang dapat diterima untuk pengukuran tinggi gelombang menggunakan sensor IMU.

Nilai MAPE yang diperoleh menunjukkan bahwa persentase kesalahan estimasi relatif kecil dibandingkan nilai referensi. Kondisi tersebut berdampak pada tingginya tingkat akurasi sistem, sehingga metode yang diterapkan mampu menghasilkan estimasi tinggi gelombang secara konsisten selama proses pengujian.

Selain itu, nilai koefisien determinasi (R²) menunjukkan tingkat hubungan yang kuat antara hasil estimasi *smart buoy* dan data referensi. Hal ini mengindikasikan bahwa variasi tinggi gelombang yang terjadi selama pengujian dapat direpresentasikan dengan baik oleh sistem yang dikembangkan.

Secara keseluruhan, hasil evaluasi menunjukkan bahwa integrasi Madgwick Filter, kompensasi gravitasi, integrasi numerik, mekanisme stabilisasi sinyal, dan Kalman Filter mampu menghasilkan estimasi tinggi gelombang yang memiliki tingkat kesesuaian tinggi terhadap data referensi. Dengan demikian, *smart buoy* berbasis IMU yang dikembangkan berpotensi digunakan sebagai alternatif sistem pemantauan tinggi gelombang laut yang sederhana, berbiaya relatif rendah, dan mampu bekerja secara *real-time*.

4. Kesimpulan

Penelitian ini berhasil mengembangkan *smart buoy* berbasis sensor IMU untuk mengestimasi tinggi gelombang laut menggunakan kombinasi Madgwick Filter dan Kalman Filter. Sistem yang dibangun mampu melakukan akuisisi data percepatan dan kecepatan sudut, mengestimasi orientasi, melakukan kompensasi gravitasi, menghitung perpindahan *heave*, serta mengestimasi Hs secara *real-time*. Data hasil pengukuran berhasil dikirim menggunakan komunikasi LoRa, disimpan pada Google Sheets, dan divisualisasikan melalui Data Studio sehingga proses pemantauan dapat dilakukan dari jarak jauh. Hasil pengujian menunjukkan bahwa *pipeline* pemrosesan sinyal yang diterapkan mampu menghasilkan estimasi tinggi gelombang yang memiliki kesesuaian terhadap data referensi. Penerapan Madgwick Filter memberikan estimasi orientasi yang stabil untuk proses kompensasi gravitasi, sedangkan Kalman Filter mampu mereduksi fluktuasi sinyal *heave* sehingga meningkatkan kualitas estimasi Hs. Berdasarkan hasil evaluasi menggunakan parameter RMSE, MAE, MAPE, akurasi, dan koefisien determinasi (R²), sistem menunjukkan kinerja yang baik dalam merepresentasikan perubahan tinggi gelombang selama pengujian. Penelitian ini menunjukkan bahwa pendekatan berbasis IMU dengan algoritma Madgwick Filter dan Kalman Filter dapat menjadi alternatif yang efektif untuk pemantauan tinggi gelombang laut menggunakan perangkat berbiaya relatif rendah. Pengembangan selanjutnya dapat difokuskan pada pengujian dalam kondisi gelombang yang lebih beragam, optimalisasi parameter penyaringan, serta integrasi dengan sensor oseanografi lainnya untuk meningkatkan akurasi dan keandalan sistem pada berbagai kondisi perairan.

Referensi

1. Andreas, M. R., Saputra, R. E., & Setianingsih, C., "Purwarupa alat pendeteksi gelombang air laut berbasis Internet of Things," *eProceedings of Engineering*, vol. 8, no. 2, pp. 2031–2044, 2021.
2. Apriadi, D., Kalsum, T. U., & Alamsyah, H., "Sistem monitoring ketinggian ombak air laut secara real-time berbasis IoT," *Jurnal Media Infotama*, vol. 19, no. 2, pp. 497–504, 2023. <https://doi.org/10.37676/jmi.v19i2.4422>
3. Büscher, N., Gis, D., Kühn, V., & Haubelt, C., "On the functional and extra-functional properties of IMU fusion algorithms for body-worn smart sensors," *Sensors*, vol. 21, no. 8, p. 2747, 2021. <https://doi.org/10.3390/s21082747>
4. Madgwick, S. O. H., Harrison, A. J. L., & Vaidyanathan, R., "Estimation of IMU and MARG orientation using a gradient descent algorithm," *Proc. IEEE ICORR*, 2011. <https://doi.org/10.1109/ICORR.2011.5975346>
5. Jiang, S., Chen, Y., & Liu, Q., "Advancements in buoy wave data processing through the application of the Sage–Husa adaptive Kalman filtering algorithm," *Sensors*, vol. 23, no. 16, 2023. <https://doi.org/10.3390/s23167298>
6. Espressif Systems, ESP32 Series Datasheet, 2025.
7. InvenSense, MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification Revision 3.4, 2023.

DOI: <https://doi.org/10.31004/riggs.v5i2.12301>

Lisensi: Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

8. Ai-Thinker, LoRa RA-02 SX1278 Module Specification, 2021.
9. Kodaira, T., Katsuno, T., Nose, T., et al., "An affordable and customizable wave buoy for the study of wave-ice interactions," *Coastal Engineering Journal*, vol. 66, no. 1, pp. 74–88, 2023. <https://doi.org/10.1080/21664250.2023.2249243>
10. Saetre, C., Tholo, H., Hovdenes, J., et al., "Directional wave measurements from navigational buoys," *Ocean Engineering*, vol. 268, 113161, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.113161>
11. Thomson, J., Bush, P., Castillo Contreras, V., et al., "Development and testing of microSWIFT expendable wave buoys," *Coastal Engineering Journal*, vol. 66, no. 1, pp. 168–180, 2024. <https://doi.org/10.1080/21664250.2023.2283325>
12. Mishra, J. P., Singh, K., & Chaudhary, H., "Research advancements in ocean environmental monitoring systems using wireless sensor networks: A review," *TELKOMNIKA*, vol. 21, no. 3, pp. 513–527, 2023. <https://doi.org/10.12928/TELKOMNIKA.v21i3.24010>
13. Chai, T., & Draxler, R. R., "Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)?," *Geoscientific Model Development*, vol. 7, no. 3, pp. 1247–1250.
14. Xue, C., Guo, J., Jiang, S., et al., "Performance characteristics of newly developed real-time wave measurement buoy using the variometric approach," *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 12, no. 11, 2024. <https://doi.org/10.3390/jmse12112032>
15. Uyar, O., "Performance evaluation of IMU filtering techniques in yaw-pitch-roll calculations," *International Journal of Advanced Natural Sciences and Engineering Researches*, vol. 8, no. 8, pp. 107–115, 2024.
16. Yurovsky, Y. Y., & Kudinov, O. B., "Methods and errors of wave measurements using conventional inertial motion units," *Physical Oceanography*, vol. 32, no. 1, pp. 63–83, 2025.
17. Suwardiyanto, D., Haq, E. S., Ayatullah, M. D., & Rudiyanto, B., "Development and validation of an instrument for wave height measurement with encoder sensors and accelerometer," *Journal of Robotics and Mechatronics*, vol. 36, no. 1, pp. 229–238, 2024. <https://doi.org/10.20965/jrm.2024.p0229>
18. Zain, S. G., & Rahmawati, W., "Wireless monitoring ketinggian gelombang laut berbasis sensor Inertial Measurement Unit," *Journal of Embedded Systems, Security and Intelligent Systems*, vol. 1, no. 1, pp. 34–41, 2024.
19. Zukeram, E. S. J., Provensi, L. L., Oliveira, M. V., et al., "In situ IoT development and application for continuous water monitoring in a lentic ecosystem in South Brazil," *Water*, vol. 15, no. 13, 2310, 2023. <https://doi.org/10.3390/w15132310>