

Evaluasi Kualitas Spektral Estimasi Gelombang Smart Buoy Berbasis Sensor Inersia

Dimas Aditya Wiranata*, Anton Widodo

Program Studi Instrumentasi-MKG, Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (STMKG)
Jl. Meteorologi No. 5, Tanah Tinggi, Tangerang, Banten 15119, Indonesia
E-mail: dimasaw728@gmail.com

Naskah Masuk: 22 Juli 2026; Diterima: 07 September 2026 ; Terbit: 30 September 2026

ABSTRAK

Abstrak- Pengukuran gelombang menggunakan sensor inersia pada smart buoy berbiaya rendah rentan terhadap artefak frekuensi rendah, kuantisasi periode puncak, dan salah tafsir ketika quality control hanya memeriksa kegagalan sensor. Penelitian ini mengevaluasi kualitas spektral 47 rekaman utama yang diperoleh saat prototipe smart buoy mengapung bebas di Perairan Kepulauan Seribu. ICM-20948 diakuisisi pada 20 Hz, dirata-ratakan menjadi 5 Hz, lalu diproses pada jendela 120 s menggunakan koreksi orientasi, detrending, Hann window, dan transformasi Fourier. Tinggi gelombang signifikan berada pada 0,624-1,911 m dengan rata-rata 1,255 m, sedangkan periode puncak berada pada 12-20 s. Analisis tambahan menunjukkan resolusi spektral 0,00833 Hz dan 32 dari 47 rekaman, atau 68,1%, menempatkan puncak spektrum tepat pada batas bawah 0,05 Hz. Proporsi ini memiliki interval kepercayaan Wilson 95% sebesar 53,8-79,6%. Kondisi tersebut tidak terdeteksi oleh wave_qc internal karena seluruh rekaman bernilai nol. Perbandingan kontekstual dengan rentang BMKG menghasilkan 24 rekaman di dalam rentang 0,5-1,25 m dan 23 rekaman di atasnya, tanpa dominasi kategori yang bermakna. Temuan memperlihatkan bahwa keberhasilan pemrosesan tidak sama dengan keterjaminan kualitas spektral. Quality control bertingkat yang memisahkan fase operasional, flag sensor, dan okupansi batas frekuensi diperlukan sebelum H_s dan T_p dipakai untuk keputusan operasional.

Kata kunci: Kualitas Data, Sensor Inersia, Smart Buoy, Spektrum Gelombang, Tinggi Gelombang

ABSTRACT

Abstract- Wave measurements using inertial sensors on low-cost smart buoys are vulnerable to low-frequency artifacts, peak-period quantization, and misinterpretation when quality control only checks sensor failures. This study evaluates the spectral quality of 47 primary records collected while a smart buoy prototype was freely floating in the Thousand Islands waters. The ICM-20948 was sampled at 20 Hz, averaged to an effective 5 Hz, and processed in 120 s windows using orientation correction, detrending, a Hann window, and a Fourier transform. Significant wave height ranged from 0.624 to 1.911 m with a mean of 1.255 m, while peak period ranged from 12 to 20 s. Additional diagnostics yielded a spectral resolution of 0.00833 Hz and showed that 32 of 47 records, or 68.1%, placed the spectral peak exactly at the lower boundary of 0.05 Hz. The 95% Wilson confidence interval for this proportion was 53.8-79.6%. This condition was not detected by the onboard wave_qc because all records had a zero flag. A contextual comparison with the BMKG range placed 24 records within 0.5-1.25 m and 23 above it, with no meaningful category dominance. The findings show that successful signal processing does not ensure spectral reliability. A layered quality-control approach that separates operational phase, sensor flags, and lower-frequency boundary occupancy is required before H_s and T_p are used for operational decisions.

Keywords: Data Quality, Inertial Sensor, Smart Buoy, Wave Spectrum, Significant Wave Height

Copyright © 2026 Jurnal Teknik Elektro dan Komputasi (ELKOM)

1. PENDAHULUAN

Pengamatan gelombang secara in situ tetap diperlukan untuk keselamatan pelayaran, verifikasi prakiraan, perencanaan pesisir, dan evaluasi sistem kelautan. Platform komersial mampu menghasilkan data yang baik, tetapi harga perangkat, operasi kapal, dan perawatan membatasi kepadatan jaringan pengamatan. Perkembangan sensor mikro-elektromekanis, mikrokontroler, Global Navigation Satellite System (GNSS), dan komunikasi nirkabel mendorong lahirnya smart buoy yang lebih kecil dan lebih mudah direplikasi [1]-[4].

Sensor inersia menjadi pilihan praktis karena satu modul dapat merekam percepatan, kecepatan sudut, dan orientasi badan buoy. Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa buoy berbasis microelectromechanical system dapat mengestimasi tinggi dan periode gelombang, baik pada uji tangki maupun lapangan [5]-[8]. Akan tetapi, pengukuran berbasis percepatan mempunyai persoalan khas. Kesalahan orientasi dan komponen

gravitasi yang tersisa dapat berkembang menjadi energi semu setelah percepatan dikonversi menjadi perpindahan. Penguatan tersebut paling besar pada frekuensi rendah karena spektrum perpindahan diperoleh dengan membagi spektrum percepatan terhadap pangkat empat frekuensi sudut [5]-[8].

Keterbatasan ini berpengaruh langsung terhadap periode puncak. Puncak spektrum yang jatuh pada batas bawah pita analisis dapat menunjukkan gelombang berperiode panjang, tetapi dapat pula menandakan drift, gerakan mooring, koreksi orientasi yang belum stabil, atau jendela pengamatan yang terlalu pendek. LainePoiss, SFY, dan prototipe berukuran sangat kecil melaporkan bahwa artefak frekuensi rendah masih menjadi masalah utama pada buoy berbasis inertial measurement unit [6]-[8]. Validasi terhadap buoy referensi atau wave gauge juga tetap menjadi praktik penting [9]-[12].

Prototipe pada penelitian ini telah diuji di Perairan Kepulauan Seribu dan menghasilkan 53 rekaman unik. Sebanyak 47 rekaman diperoleh ketika buoy mengapung bebas, sementara enam rekaman berasal dari fase awal dan akhir ketika alat masih berada di atas kapal. Firmware telah memiliki bit flag `wave_qc` untuk kondisi sinyal lemah, kemiringan berlebih, percepatan tidak realistis, periode tidak valid, spektrum lemah, dan kegagalan pembacaan sensor. Meskipun demikian, seluruh data lapangan memperoleh `wave_qc` = 0. Temuan awal lain menunjukkan bahwa sebagian besar T_p bernilai tepat 20 s, yaitu batas periode terpanjang dari pita 0,05-0,5 Hz.

Penelitian ini bertujuan mengevaluasi kualitas spektral keluaran gelombang smart buoy melalui empat langkah. Pertama, data dipisahkan berdasarkan fase operasional. Kedua, statistik H_s , T_p , T_{m02} , dan frekuensi puncak diperiksa. Ketiga, resolusi transformasi Fourier dan okupansi puncak pada batas bawah dianalisis. Keempat, hasil quality control internal dibandingkan dengan diagnosis spektral pascapengukuran. Kontribusi utama penelitian ialah penyusunan indikator okupansi batas spektrum yang sederhana, dapat dihitung dari keluaran bulk parameter, dan dapat digunakan untuk mencegah interpretasi berlebihan ketika raw spectrum tidak tersedia di server.

2. METODE PENELITIAN

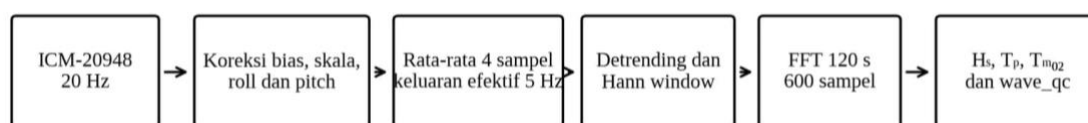
2.1 Platform dan pengujian lapangan

Perangkat yang diuji adalah smart buoy berdiameter sekitar 0,50 m, tinggi 0,40 m, dan massa 13 kg. Substansi gelombang menggunakan ICM-20948 yang dipasang pada bidang tetap di dalam ruang elektronik. Data lingkungan dan posisi dicatat bersama keluaran gelombang pada kartu microSD. Uji laut dilakukan pada 14 Juli 2026 di Perairan Kepulauan Seribu selama 03.05-05.57 UTC.

Operasi dibagi menjadi fase awal di atas kapal pada 03.05-03.15 UTC, fase mengapung bebas pada 03.30-05.48 UTC, dan fase akhir di atas kapal pada 05.51-05.57 UTC. Pemisahan ini penting karena gerakan pada kapal tidak mewakili respons buoy sebagai pengikut permukaan. Dari 53 timestamp unik, 47 rekaman fase mengapung bebas digunakan untuk analisis utama.

Tabel 1. Konfigurasi pengukuran dan dataset

Parameter	Nilai
Sensor gerak	ICM-20948, accelerometer dan gyroscope tiga sumbu
Frekuensi akuisisi awal	Sekitar 20 Hz
Frekuensi efektif	5 Hz setelah rata-rata empat sampel
Durasi jendela	120 s
Jumlah sampel per jendela	600
Interval pengukuran	Sekitar 180 s
Pita analisis	0,05-0,50 Hz
Jumlah rekaman utama	47
Lokasi dan tanggal	Perairan Kepulauan Seribu, 14 Juli 2026



Gambar 1. Alur pengolahan parameter gelombang pada firmware

Gambar 1 menunjukkan alur pengolahan parameter gelombang yang dijalankan pada firmware smart buoy selama proses akuisisi data lapangan. Alur tersebut digunakan pada setiap siklus pengukuran untuk

mengubah data mentah sensor inersia menjadi parameter gelombang yang tersimpan pada sistem. Proses dimulai dari pembacaan data accelerometer dan gyroscope, kemudian dilanjutkan dengan koreksi orientasi, transformasi percepatan ke koordinat bumi, penghilangan komponen gravitasi, serta pengolahan spektral untuk memperoleh parameter H_s , T_p , dan T_{m02} . Keluaran dari proses firmware tersebut selanjutnya digunakan sebagai dataset utama dalam evaluasi kualitas spektral pada penelitian ini. Dengan demikian, Gambar 1 menggambarkan posisi pemrosesan onboard sebelum data keluaran dianalisis lebih lanjut melalui pemeriksaan kualitas spektral pascapengukuran.

2.2 Pengolahan sinyal gelombang

Mengikuti alur pada Gambar 1, setiap sampel accelerometer dikoreksi menggunakan bias dan faktor skala hasil kalibrasi. Roll dan pitch dihitung melalui complementary filter yang menggabungkan accelerometer dan gyroscope. Vektor percepatan selanjutnya ditransformasikan dari body frame ke earth frame, lalu gravitasi dikurangi untuk memperoleh percepatan vertikal dinamis.

Keluaran 20 Hz dirata-ratakan setiap empat sampel sehingga frekuensi efektif menjadi 5 Hz. Dalam satu jendela 120 s tersedia 600 sampel. Data kemudian melalui detrending dan Hann window untuk mengurangi offset, tren linier, dan spectral leakage. Transformasi Fourier menghasilkan spektrum percepatan vertikal. Spektrum elevasi atau perpindahan diperoleh menggunakan hubungan berikut.

$$S\eta(f) = S_a \frac{z(f)}{(2\pi f)^4} \quad (1)$$

Momen spektral dihitung pada pita 0,05-0,50 Hz. Parameter bulk yang digunakan dalam penelitian ini adalah H_s , T_p , dan T_{m02} .

$$m_n = \int f^n S\eta(f) df \quad (2)$$

$$H_s = 4\sqrt{m_0}; \quad T_p = \frac{1}{f_p}; \quad T_{m02} = \sqrt{\frac{m_0}{m_2}} \quad (3)$$

Durasi jendela menentukan resolusi frekuensi. Untuk transformasi sepanjang T_w , jarak antarkomponen frekuensi adalah $\Delta f = 1/T_w$. Pada $T_w = 120$ s, Δf bernilai 0,00833 Hz. Nilai T_p yang muncul pada dataset, yaitu 20,00; 17,14; 15,00; dan 12,00 s, bertepatan dengan bin 0,0500; 0,0583; 0,0667; dan 0,0833 Hz.

2.3 Pemeriksaan kualitas dan analisis tambahan

Quality control internal firmware menggunakan bit flag untuk menandai sinyal terlalu rendah, kemiringan terlalu besar, percepatan tidak realistis, periode tidak valid, spektrum lemah, atau kegagalan IMU. Nilai nol berarti tidak ada kondisi tersebut yang terpicu. Pemeriksaan pascapengukuran menambahkan tiga konteks yang belum tercakup: fase operasional, okupansi puncak pada batas frekuensi, dan keterbatasan pambanding regional.

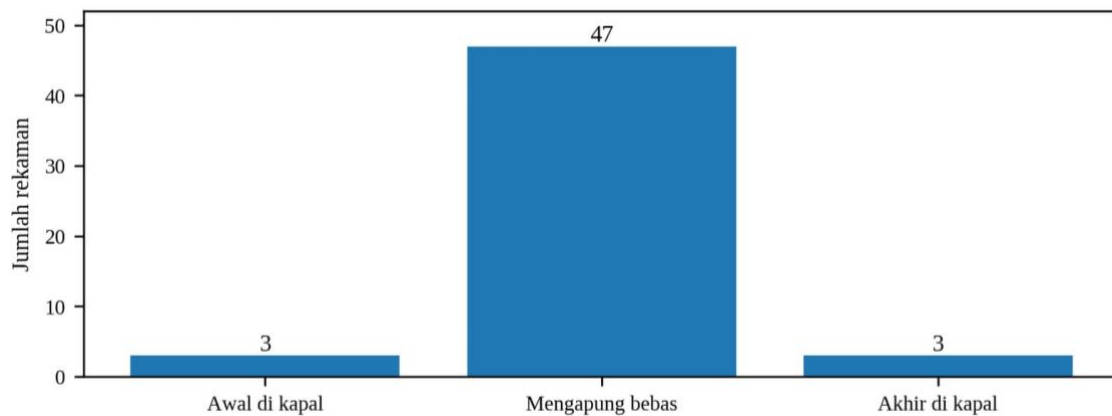
Indikator utama adalah boundary occupancy ratio (BOR), yaitu proporsi rekaman yang mempunyai f_p sama dengan batas bawah f_{min} . Interval kepercayaan 95% untuk proporsi BOR dihitung dengan metode Wilson. Nilai H_s juga dikelompokkan terhadap rentang informasi maritim BMKG 0,5-1,25 m yang tersedia pada sistem saat pengujian. Pembagian 24 rekaman di dalam rentang dan 23 di atas rentang diuji secara binomial terhadap proporsi 0,5. Analisis ini hanya menilai keseimbangan kategori, bukan akurasi instrumen, karena prakiraan regional tidak colocated dengan buoy.

$$BOR = \frac{n(f_p = f_{min})}{N} \quad (4)$$

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Kelengkapan data dan pemisahan fase

Seluruh 53 rekaman memiliki timestamp unik. Tiga rekaman awal dan tiga rekaman akhir tidak digunakan untuk statistik gelombang karena buoy masih berada di atas kapal. Pemisahan ini mengurangi risiko mencampurkan gerakan kapal, proses penurunan, dan proses pengangkatan dengan respons buoy terhadap gelombang. Sebanyak 47 rekaman, atau 88,7% dari keseluruhan data, dipertahankan sebagai fase utama.



Gambar 2. Jumlah rekaman pada setiap fase operasional

Tabel 2. Pemeriksaan awal kualitas dataset

Aspek	Hasil	Interpretasi
Timestamp	53 data unik	Tidak ditemukan duplikasi
Fase utama	47 data	Digunakan untuk analisis gelombang
Fase transisi	6 data	Disimpan sebagai jejak operasional
GNSS	12 satelit pada seluruh data utama	Fix posisi tersedia secara kontinu
wave_qc internal	0 pada 47 data	Tidak ada flag sensor atau firmware aktif

Jendela 120 s dijalankan pada interval sekitar 180 s sehingga duty cycle nominal pengamatan gelombang adalah 66.7%. Artinya, sekitar sepertiga waktu antarproduk bulk tidak tercakup oleh jendela spektral. Pengaturan ini memadai untuk telemetri periodik, tetapi perubahan gelombang yang terjadi pada jeda 60 s dapat tidak tercatat. Untuk pengujian validasi, penyimpanan raw acceleration secara kontinu atau penggunaan jendela overlap akan memberi informasi yang lebih lengkap.

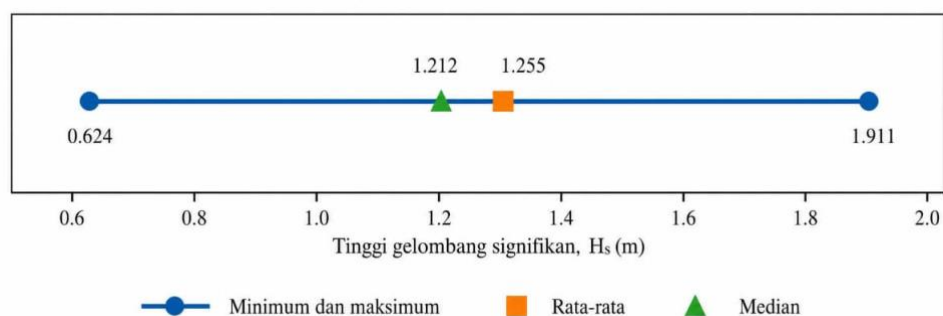
3.2 Statistik parameter gelombang

Tabel 3. Statistik parameter gelombang pada 47 rekaman utama

Parameter	Minimum	Maksimum	Rata-rata	Median
H_s (m)	0,624	1,911	1,255	1,212
T_p (s)	12,00	20,00	18,73	20,00
T_{m02} (s)	4,56	14,56	8,55	8,14
f_p (Hz)	0,0500	0,0833	0,0542	0,0500

H_s berada pada rentang 0,624-1,911 m. Nilai rata-rata 1,255 m sedikit lebih tinggi daripada median 1,212 m, sehingga distribusi cenderung memiliki ekor ke nilai yang lebih besar. Namun, simpangan baku dan kuartil tidak dihitung dari ringkasan onboard. Karena itu, kesimpulan tentang bentuk distribusi dibatasi pada perbandingan nilai pemusatan dan rentang.

Rentang dan pemusatan H_s pada 47 rekaman utama



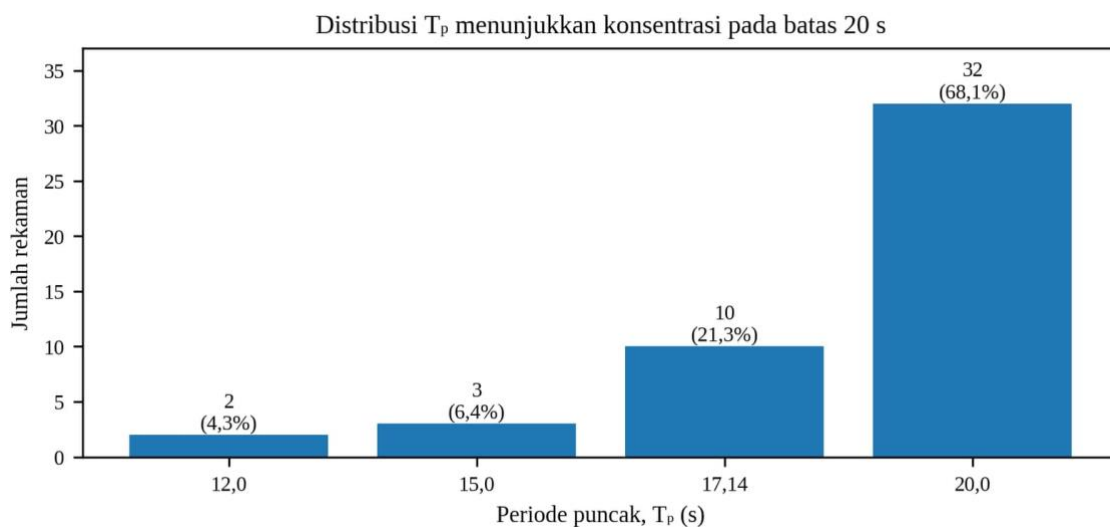
Gambar 3. Rentang, rata-rata, dan median H_s pada fase utama

T_{m02} mempunyai rata-rata 8,55 s dan median 8,14 s, jauh lebih pendek daripada T_p yang bermedian 20 s. Perbedaan ini dapat muncul pada spektrum dengan puncak sempit di frekuensi rendah tetapi energi yang cukup tersebar pada frekuensi lebih tinggi. Tanpa spektrum mentah, bentuk spektrum tidak dapat direkonstruksi. Meski begitu, ketidakseimbangan antara T_p dan T_{m02} menjadi alasan tambahan untuk tidak menggunakan T_p sebagai satu-satunya indikator periode representatif.

3.3 Konsentrasi periode puncak pada batas bawah

Tabel 4. Kuantisasi periode puncak oleh jendela 120 s

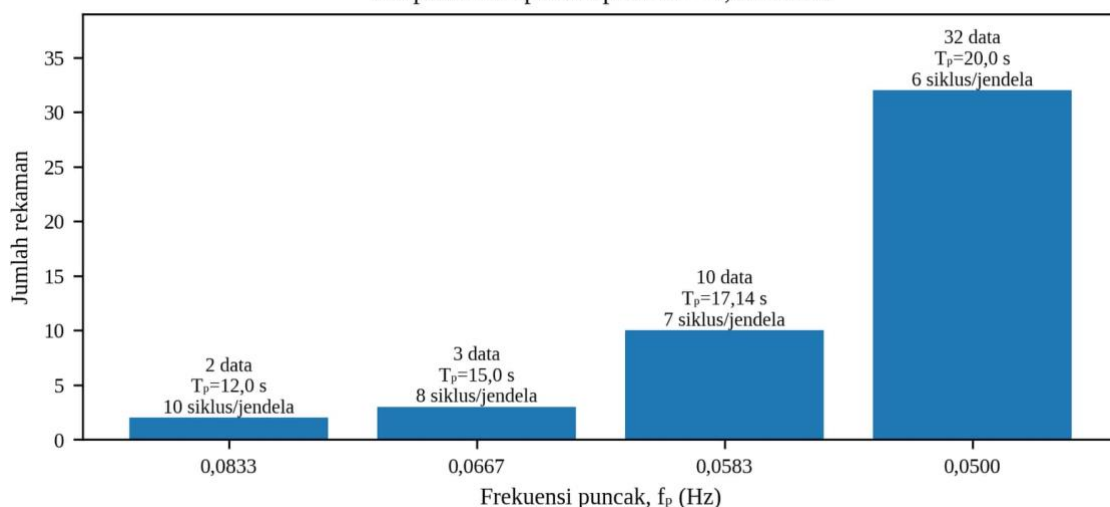
T_p (s)	f_p (Hz)	Bin terhadap Δf	Siklus dalam 120 s	Jumlah data
12,00	0,0833	10	10	2
15,00	0,0667	8	8	3
17,14	0,0583	7	7	10
20,00	0,0500	6	6	32



Gambar 4. Distribusi periode puncak hasil pengolahan onboard

Sebanyak 32 dari 47 rekaman menghasilkan $T_p = 20$ s atau $f_p = 0,05$ Hz. BOR mencapai 68.1% dengan interval kepercayaan Wilson 95% 53.8-79.6%. Nilai tersebut menunjukkan bahwa konsentrasi pada batas bukan kejadian sporadis. Bahkan pada batas bawah interval kepercayaan, lebih dari separuh populasi rekaman serupa diperkirakan tetap menempatkan puncak pada $f_{\min}$.

Okupansi bin spektral pada $\Delta f = 0,00833$ Hz



Gambar 5. Okupansi bin frekuensi puncak dan jumlah siklus per jendela

Pada $f_p = 0,05$ Hz, satu jendela hanya mengandung enam siklus. Jumlah siklus yang terbatas meningkatkan variasi estimasi puncak dan membuat frekuensi terendah lebih mudah menjadi lokasi maksimum ketika terdapat drift residual. Konversi S_a menjadi S_n juga memperbesar energi frekuensi rendah melalui faktor $(2\pi f)^{-4}$. Penelitian buoy berbasis MEMS sebelumnya melaporkan artefak serupa dan menekankan pengaruh koreksi orientasi, noise gyroscope, serta batas integrasi [5]-[8].

Temuan ini tidak membuktikan bahwa seluruh 32 rekaman salah. Gelombang berperiode sekitar 20 s mungkin saja hadir. Masalahnya ialah puncak berada tepat pada batas analisis sehingga tidak diketahui apakah energi sebenarnya memuncak pada 0,05 Hz atau masih meningkat pada frekuensi yang lebih rendah. Secara statistik, T_p tersebut mengalami left-boundary censoring. Nilainya sebaiknya dilaporkan sebagai $T_p \geq 20$ s atau diberi status review sampai spektrum dan data referensi diperiksa.

3.4 Evaluasi quality control bertingkat

Seluruh rekaman memperoleh $\text{wave_qc} = 0$ sehingga sistem internal menyatakan 100% data lolos. Setelah pemeriksaan spektral, hanya 15 rekaman memiliki puncak di bagian dalam pita, sedangkan 32 rekaman berada pada batas bawah. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa flag sensor dan flag interpretasi spektrum menjawab pertanyaan yang berbeda. Flag internal memastikan proses komputasi tidak gagal, tetapi belum memastikan puncak spektrum dapat diidentifikasi tanpa pengaruh batas.

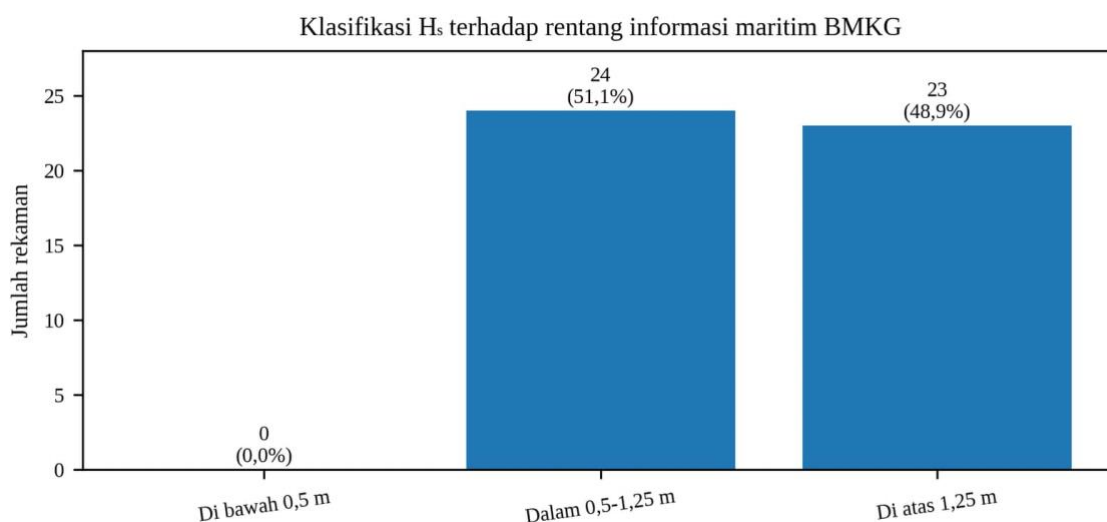
Tabel 5. Usulan quality control bertingkat

Tingkat QC	Kriteria	Status pada dataset	Tindakan
QC-0 Sistem	IMU terbaca, percepatan wajar, periode valid, spektrum tidak lemah	47 dari 47 lolos	Data dapat diproses
QC-1 Operasional	Buoy mengapung bebas dan bukan fase kapal	47 dari 53 lolos	Enam rekaman tidak dipakai untuk kondisi laut
QC-2 Batas spektrum	$f_p > f_{\min}$	15 dari 47 lolos tanpa catatan	32 rekaman diberi flag boundary
QC-3 Validasi	Ada pembanding colocated dan serentak	Belum tersedia	Tidak membuat klaim akurasi absolut

Implementasi praktis dapat menambahkan satu bit untuk `spectral_boundary_flag`. Bit tersebut aktif ketika indeks bin puncak sama dengan indeks frekuensi minimum atau ketika energi puncak tidak menurun menuju batas. Jika bandwidth payload tidak dapat ditambah, flag ini dapat digabungkan dalam field `wave_qc` yang sudah tersedia. Pada server, nilai T_p tetap disimpan, tetapi dashboard menampilkan label "batas spektrum" agar pengguna tidak menganggap 20 s sebagai estimasi presisi.

3.5 Perbandingan kontekstual dengan informasi BMKG

Sebanyak 24 rekaman H_s berada dalam rentang 0,5-1,25 m dan 23 rekaman berada di atas 1,25 m. Tidak ada rekaman di bawah 0,5 m. Uji binomial dua sisi terhadap proporsi 0,5 memberikan $p = 1,000$ untuk pembagian 24:23. Dengan kata lain, tidak ada dominasi yang jelas antara kategori di dalam rentang dan di atas rentang.



Gambar 6. Kategori H_s terhadap rentang informasi maritim BMKG

Perbandingan ini berguna sebagai pemeriksaan kewajaran regional, tetapi tidak dapat menggantikan validasi. Informasi BMKG mewakili area prakiraan dan interval waktu tertentu, sedangkan smart buoy mengukur titik yang bergerak pada jendela 120 s. Studi validasi buoy pada umumnya menggunakan instrumen yang berdekatan dan serentak, kemudian menghitung bias, root mean square difference, korelasi, dan scatter index [9]-[12]. Karena pembandingan seperti itu belum tersedia, hasil penelitian ini dibatasi pada kinerja operasional dan diagnosis kualitas spektral.

3.6 Implikasi terhadap konfigurasi pengukuran

Konfigurasi 120 s menghasilkan resolusi 0,00833 Hz. Resolusi ini cukup untuk membedakan bin 0,0500; 0,0583; 0,0667; dan 0,0833 Hz, tetapi periode menjadi sangat terkuantisasi pada frekuensi rendah. Peningkatan durasi menjadi 300 s akan memperkecil Δf menjadi 0,00333 Hz dan menyediakan 15 siklus untuk gelombang 20 s. Jendela 600 s akan memberi Δf 0,00167 Hz dan 30 siklus. Konsekuensinya adalah konsumsi energi, waktu pemrosesan, dan interval telemetri yang lebih panjang.

Pilihan yang lebih seimbang adalah menyimpan akselerasi secara kontinu pada kartu SD, menghitung parameter telemetri dari jendela 300-600 s, dan menggunakan overlap 50% agar pembaruan tetap rapat. Sistem juga dapat menghitung dua periode: T_p dari puncak spektrum dan T_{m02} dari momen spektral. Ketika `spectral_boundary_flag` aktif, T_{m02} dapat digunakan sebagai periode representatif sementara, sedangkan T_p diperlakukan sebagai nilai terbatas.

Pengujian berikutnya perlu menggunakan wave gauge, pressure sensor, atau buoy referensi pada lokasi dan waktu yang sama. Minimal dua kondisi sea state dan durasi beberapa jam diperlukan agar pengaruh batas frekuensi, ukuran buoy, orientasi, dan perubahan gelombang dapat dipisahkan. Raw acceleration, orientasi, dan spektrum setiap jendela sebaiknya ikut disimpan. Dengan data tersebut, cutoff 0,03; 0,04; 0,05; dan 0,06 Hz dapat dibandingkan melalui sensitivity analysis tanpa mengulang pengujian lapangan.

4. KESIMPULAN

Analisis terhadap 47 rekaman utama menunjukkan H_s sebesar 0,624-1,911 m, T_p sebesar 12-20 s, dan T_{m02} sebesar 4,56-14,56 s. Firmware berhasil menghasilkan parameter gelombang dan seluruh rekaman lolos `wave_qc` internal. Namun, 32 rekaman atau 68,1% menempatkan puncak tepat pada batas bawah 0,05 Hz. Jendela 120 s hanya memuat enam siklus pada periode 20 s dan menghasilkan resolusi 0,00833 Hz, sehingga nilai T_p mengalami kuantisasi dan censoring pada batas spektrum. Quality control internal perlu dilengkapi dengan pemisahan fase operasional dan `spectral_boundary_flag`. Hasil H_s dapat digunakan sebagai keluaran operasional awal dengan catatan, sedangkan $T_p = 20$ s sebaiknya dilaporkan sebagai nilai batas sampai spektrum mentah atau instrumen referensi tersedia. Pengujian lanjutan disarankan memakai jendela 300-600 s, overlap, penyimpanan raw acceleration, serta validasi colocated.

REFERENSI

- [1] World Meteorological Organization, Guide to Wave Analysis and Forecasting, WMO-No. 702. Geneva, Switzerland: WMO, 2020.
- [2] A. Majumder, M. Losito, S. Paramasivam, A. Kumar, and G. Gatto, "Buoys for marine weather data monitoring and LoRaWAN communication," *Ocean Engineering*, vol. 313, art. 119521, 2024, doi: 10.1016/j.oceaneng.2024.119521.
- [3] J. F. Martínez-Osuna, F. J. Ocampo-Torres, L. Gutiérrez-Loza, E. Valenzuela, A. Castro, R. Alcaraz, C. Rodríguez, and L. R. Ulloa, "Coastal buoy data acquisition and telemetry system for monitoring oceanographic and meteorological variables in the Gulf of Mexico," *Measurement*, vol. 183, art. 109841, 2021, doi: 10.1016/j.measurement.2021.109841.
- [4] J. Rabault et al., "OpenMetBuoy-v2021: An easy-to-build, affordable, customizable, open-source instrument for oceanographic measurements of drift and waves in sea ice and the open ocean," *Geosciences*, vol. 12, no. 3, art. 110, 2022, doi: 10.3390/geosciences12030110.
- [5] Y. Y. Yurovsky and V. A. Dulov, "MEMS-based wave buoy: Towards short wind-wave sensing," *Ocean Engineering*, vol. 217, art. 108043, 2020, doi: 10.1016/j.oceaneng.2020.108043.
- [6] V. Alari et al., "LainePoiss: A lightweight and ice-resistant wave buoy," *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol. 39, no. 5, pp. 573-594, 2022, doi: 10.1175/JTECH-D-21-0091.1.
- [7] G. Hope et al., "SFY: A lightweight, high-frequency, and phase-resolving wave buoy for coastal waters," *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol. 42, no. 2, 2025, doi: 10.1175/JTECH-D-23-0170.1.
- [8] Y. Y. Yurovsky and O. B. Kudinov, "A very small wave buoy: The challenges learned from a proof-of-concept field experiment," *Ocean Engineering*, vol. 350, art. 124212, 2026, doi: 10.1016/j.oceaneng.2026.124212.

- [9] Y. Hisaki, "Validation of drifting buoy data for ocean wave observation," *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 9, no. 7, art. 729, 2021, doi: 10.3390/jmse9070729.
- [10] C. O. Collins et al., "Performance of moored GPS wave buoys," *Coastal Engineering Journal*, pp. 17-43, 2024, doi: 10.1080/21664250.2023.2295105.
- [11] K. Raghukumar, G. Chang, F. Spada, C. Jones, T. Janssen, and A. Gans, "Performance characteristics of Spotter, a newly developed real-time wave measurement buoy," *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol. 36, no. 6, pp. 1127-1141, 2019, doi: 10.1175/JTECH-D-18-0151.1.
- [12] H. Gu, X. Zhu, R. Shan, J. Zang, L. Qian, and P. Lin, "Evaluation of a GNSS for wave measurement and directional wave spectrum analysis," *Ocean Engineering*, vol. 270, art. 113683, 2023, doi: 10.1016/j.oceaneng.2023.113683.
- [13] A. Salcedo-Bosch, F. Rocadenbosch, M. A. Gutiérrez-Antuñano, and J. Tiana-Alsina, "Estimation of wave period from pitch and roll of a lidar buoy," *Sensors*, vol. 21, no. 4, art. 1310, 2021, doi: 10.3390/s21041310.
- [14] A. C. Brown and R. K. Paasch, "The accelerations of a wave measurement buoy impacted by breaking waves in the surf zone," *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 9, no. 2, art. 214, 2021, doi: 10.3390/jmse9020214.
- [15] Y.-Z. Zhong, H. Chien, H.-M. Chang, and H.-Y. Cheng, "Ocean wind observation based on the mean square slope using a self-developed miniature wave buoy," *Sensors*, vol. 22, no. 19, art. 7210, 2022, doi: 10.3390/s22197210.
- [16] F. Feddersen et al., "The Wavedrifter: A low-cost IMU-based Lagrangian drifter to observe steepening and overturning of surface gravity waves and the transition to turbulence," *Coastal Engineering Journal*, 2023, doi: 10.1080/21664250.2023.2238949.
- [17] P. K. Jangir, K. C. Ewans, and I. R. Young, "Comparative performance of radar, laser, and Waverider buoy measurements of ocean waves. Part I: Frequency-domain analysis," *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol. 40, no. 5, pp. 605-627, 2023, doi: 10.1175/JTECH-D-22-0108.1.
- [18] C. Sætre et al., "Directional wave measurements from navigational buoys," *Ocean Engineering*, vol. 268, art. 113161, 2023, doi: 10.1016/j.oceaneng.2022.113161.