

---

**RANCANG BANGUN ALAT UKUR POTENSI GELOMBANG LAUT DENGAN  
METODE SUPERPOSISI GELOMBANG**  
*THE DESIGN AND DEVELOPMENT OF A SEA WAVE POTENTIAL MEASUREMENT DEVICE  
USING THE WAVE SUPERPOSITION METHOD*

**Ahmad Khairul Kahfi\*, Nu Rhahida Arini, Wahjoe Tjatur Sesulihatien**

Magister Teknik Elektro, Politeknik Elektronika Negeri Surabaya  
Kampus PENS, Jalan Raya ITS, Keputih, Sukolilo, Surabaya, Indonesia

\*Corresponding author email : [ahmadkahfi987@gmail.com](mailto:ahmadkahfi987@gmail.com)

Submitted: 18 May 2025 / Revised: 10 July 2025 / Accepted: 30 July 2025

<http://doi.org/10.21107/jk.v18i2.30124>

**ABSTRACT**

Banyak perangkat maritim, seperti sistem navigasi kapal dan Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut (PLTGL), sangat bergantung pada data karakteristik gelombang laut. Beberapa alat ukur karakteristik gelombang laut telah dijual di pasaran, namun tidak terjangkau dan sulit dioperasikan. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan membangun alat ukur ketinggian gelombang laut berbasis pengolahan sinyal menggunakan metode Fast Fourier Transform (FFT) dan prinsip superposisi. Sistem pengukuran menggunakan sensor Inertial Measurement Unit (IMU) yang merekam data percepatan secara real-time. Data tersebut kemudian dianalisis untuk mengekstrak parameter utama gelombang, termasuk tinggi gelombang, frekuensi, dan kecepatan rambat gelombang. Eksperimen dilakukan di fasilitas wave generator selama 5 menit dengan frekuensi pengambilan data sebesar 25 Hz. Hasil eksperimen menunjukkan kondisi gelombang uji pada frekuensi motor 25 Hz mempunyai tinggi gelombang air sebesar 1 cm. Hasil pengukuran dibandingkan dengan pengukuran/pengamatan visual di kolom wave generator menunjukkan perbedaan pengukuran sebesar 2% dengan frekuensi dominan yang didapatkan berada di 3,2 Hz yang didapatkan dari amplitudo dominan di sinyal domain waktu. Studi ini diharapkan dapat berkontribusi dalam perkembangan teknologi maritim dalam mendukung sektor pelayaran dan energi terbarukan berbasis kelautan di Indonesia.

**Kata Kunci:** Ketinggian Gelombang, FFT, Gelombang Superposisi, Karakteristik Gelombang, Sensor IMU.

**ABSTRAK**

Many maritime devices, such as ship navigation systems and Wave Ocean Power Plants, rely heavily on data on ocean wave characteristics. Several water wave characteristic measuring instruments have been sold on the market, but not affordable and difficult to operate. The aim of this study is to design and build a wave height measuring instrument based on signal processing using the Fast Fourier Transform (FFT) method and the superposition wave. The measurement system uses an Inertial Measurement Unit (IMU) sensor that records acceleration data in real time. The data is analyzed to extract the main parameters of the wave, including wave height, frequency, and wave propagation speed. The experiment is conducted at the wave generator facility for 5 minutes with a data collection frequency of 25 Hz. The results of the experiment show that the test wave conditions at a motor frequency of 25 Hz had a water wave height of 1 cm. The measurement results compared with the visual measurement/observation in the wave generator column show a measurement difference of 2%, with the dominant frequency obtained being 3.2 Hz, derived from the dominant amplitude in the time domain signal. This study is expected to contribute to the development of maritime technology in supporting the shipping and marine-based renewable energy sectors in Indonesia.

**Keywords:** FFT, IMU Sensor, Superposition Wave, Wave Characteristic, Wave Height

---

## PENDAHULUAN

Gelombang air merupakan salah satu perwujudan energi kinetik yang terjadi akibat gerakan air di permukaan laut. Energi yang terkandung dalam fenomena gelombang ini memiliki potensi besar untuk dimanfaatkan, salah satunya sebagai sumber energi alternatif untuk pembangkitan tenaga listrik. Dalam konteks kelautan, pemanfaatan energi gelombang menjadi salah satu solusi strategis dalam mendukung pengembangan energi terbarukan yang ramah lingkungan. Oleh karena itu, (Hereman, 2013) menekankan bahwa pengukuran karakteristik gelombang air yang signifikan mencakup tinggi gelombang, panjang gelombang, dan frekuensi gelombang. Tinggi gelombang mencerminkan ketinggian puncak gelombang. Panjang gelombang adalah ukuran jarak antara dua puncak atau lembah secara berturut-turut, sedangkan frekuensi gelombang mencerminkan jumlah gelombang yang melalui suatu titik dalam satu periode waktu.

Perangkat khusus diperlukan untuk membaca karakteristik gelombang laut. Perangkat tersebut berupa sistem instrumentasi yang dipasang pada sebuah pelampung (buoy) yang dapat mengukur gelombang laut secara *real-time*. Banyak perangkat yang sudah didesain dan dijual di pasaran. Namun demikian, perangkat/platform pengukuran gelombang yang ada saat ini tidak tersedia dengan harga terjangkau dan membutuhkan keahlian khusus dalam mengoperasikannya. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan membangun sebuah perangkat pengukuran gelombang yang mudah digunakan dengan struktur yang stabil. Perangkat yang didesain mampu membaca ketinggian gelombang laut dan diproses menggunakan metode pemrosesan sinyal untuk menghitung parameter gelombang seperti tinggi rata-rata dan frekuensi domain. Hasil penelitian ini digunakan untuk membantu memahami karakteristik gelombang air laut, khususnya dalam konteks gelombang acak yang umum terjadi di perairan terbuka. Pendekatan metodologis yang digunakan adalah eksperimental dan komputasional yang dapat memberikan ketelitian yang baik.

Perangkat pengukuran gelombang yang didesain terdiri dari komponen pelampung dan alat ukur yang menggunakan sensor IMU. Fungsi utama dari pelampung adalah memberikan respon gerakan gelombang laut yang terbaca oleh sensor IMU. (Mai *et al.*, 2024) memberikan penjelasan bahwa sebuah pelampung dapat berbentuk silinder atau bola

dan terhubung erat dengan struktur apung seperti dinding pemecah gelombang. Sedangkan (Mayon *et al.*, 2022) menjelaskan bahwa pelampung digerakkan oleh gelombang laut, dan gerakan relatif yang dihasilkan biasanya gerakan naik turun atau gerakan lainnya tergantung pada desain perangkat bisa diubah menjadi gerakan bolak-balik untuk menghasilkan arus penggerak gelombang.

Untuk membaca pergerakan gelombang laut jenis sensor yang dapat dipasangkan pada pelampung untuk mengukur gerakan gelombang air, salah satu sensor yang digunakan untuk pembacaan ketinggian gelombang laut adalah sensor *Inertial Measurement Unit (IMU)*. Berkat kemajuan dalam teknologi sensor, IMU telah menjadi salah satu pilihan utama untuk pemantauan gerakan gelombang air laut karena harganya yang terjangkau, kemudahan dalam penggunaannya dan kemampuannya yang baik dalam mendeteksi pergerakan. Sensor IMU merupakan perangkat yang terjangkau dan tersedia secara luas, serta memungkinkan pemantauan gelombang laut secara nyata (Benetazzo *et al.*, 2012). Untuk mengetahui karakteristik gelombang laut dapat dilakukan dengan menggunakan salah satu metode analisis data melalui pergerakan permukaan air yang dikumpulkan, kemudian data tersebut diolah menggunakan teknik pemrosesan sinyal seperti superposisi gelombang dan *Fast Fourier Transform (FFT)*. Pendekatan ini tidak hanya meningkatkan efektivitas penelitian oseanografi, tetapi juga berkontribusi pada pemantauan lingkungan laut terhadap sektor pengembangan struktur apung secara keseluruhan (Djatkiko, 2019).

Pengumpulan data jangka panjang yang akurat tetap menjadi tantangan meskipun terdapat sistem pengukuran gelombang standar, yang sering kali sangat mahal dan memerlukan pemeliharaan yang ekstensif. Perangkat pengukur gelombang konvensional biasanya memiliki keterbatasan terkait pengumpulan data waktu nyata, konsumsi daya, dan pembatasan lingkungan (Christou & Ewans, 2014). Dengan memasukkan sensor IMU ke dalam perangkat pengukuran gelombang laut, beberapa kelemahan yang disebutkan sebelumnya yang bergantung hanya pada perangkat yang tidak mampu mendapatkannya sekarang dapat diatasi didalam penelitian yang dikerjakan sekarang. Oleh karena itu, tujuan penelitian berikut harus ditangani dalam studi ini: seberapa baik sensor IMU dapat mendeteksi parameter gelombang seperti tinggi, frekuensi, dan kecepatan?, manfaat dan

kerugian mengukur gelombang dengan sensor IMU sebagai alternatif perangkat pengukuran yang lebih mahal dan seberapa efektif pendekatan superposisi gelombang dan FFT untuk data gerakan gelombang?.

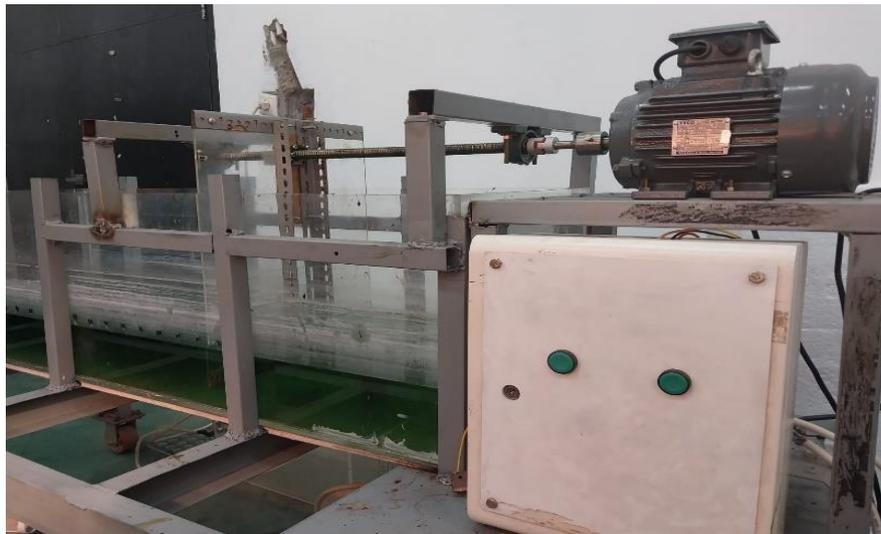
Meskipun berbagai penelitian sebelumnya telah menggunakan IMU, termasuk accelerometer dan gyroscope, sebagai alat akuisisi data gelombang, Sebagian besar studi tersebut hanya memanfaatkan data yang sudah diperoleh atau melalui mikrokontroler tanpa menerapkan pendekatan analisis lanjutan seperti superposisi gelombang. Selain itu, penggunaan metode superposisi untuk menguraikan gelombang acak menjadi gelombang regular masih jarang diintegrasikan secara langsung dengan data mentah IMU. Oleh karena itu, penelitian ini mengisi kekurangan tersebut dengan menawarkan pendekatan yang lebih terintegrasi dan hemat biaya, serta mengevaluasi keandalan sistem berbasis IMU dan pemrosesan sinyal berbasis spektrum. Menurut (Khedkar et al., 2020), teknologi *ISWEC (inertial sea wave energy converter)* berbasis mekanisme giroskopik untuk mengubah energi yang terkandung

dalam gelombang laut. Ini penting dalam hal desain sistem karena akurasi data gerakan sangat penting dalam menciptakan data waktu nyata berdasarkan gerakan pengguna, yang berlaku pada aspek pemanfaatan sensor IMU dalam mengukur tinggi gelombang di lingkungan laut yang dinamis. Keuntungan yang diharapkan mencakup efisiensi dalam akuisisi dan pemrosesan data secara *real-time* yang dapat memberikan kontribusi yang signifikan pada bidang penelitian maritim dan pengembangan teknologi energi terbarukan pada sektor kelautan.

## MATERI DAN METODE

### Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian dilakukan dalam skala laboratorium didalam Wave Generator dengan mengatur kecepatan motor yang menghasilkan gelombang regular. Gelombang regular tersebut dibaca oleh sensor IMU didalam perangkat yang dibuat menyerupai catamaran ship. Penelitian dilakukan dalam jangka waktu 5 menit pembacaan selama motor bergerak dalam menghasilkan gelombang air. Lokasi penelitian bisa dilihat pada **Gambar 1**.



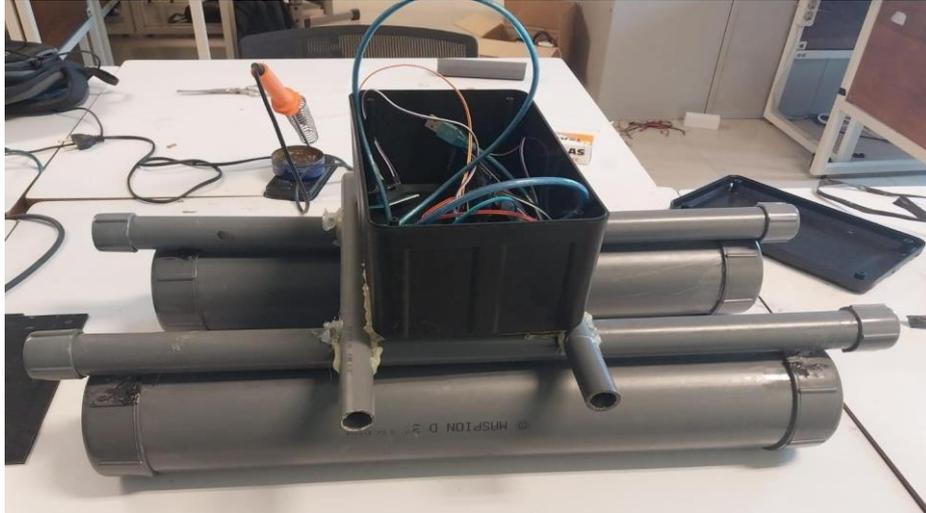
**Gambar 1.** Wave Generator.

### Alat

Alat yang digunakan memiliki desain mekanik berdasarkan model catamaran ship double hull (Pandey, 2017) (Pandey, 2017) karena pengukuran gelombang perlu dilakukan pada platform yang bergerak dan juga dengan menggunakan model catamaran bisa mengikuti bentuk gelombang air. Menurut (Mai et al., 2024) pada model catamaran ship memiliki efek interferensi lambung untuk analisis karakteristik gelombang pada konfigurasi kapal di tempat seperti danau, sungai, dan laut.

Tujuan dari studi ini dan relevansinya dalam proyek adalah untuk menunjukkan hubungan bagaimana konfigurasi fisik kapal mempengaruhi dinamika gelombang yang terlihat oleh sensor IMU.

Pelampung yang digunakan berbahan pipa PVC berdiameter 3 inch. Untuk penyimpanan sensor berada didalam kotak berbahan plastic dengan panjang 24,2 cm, lebar 14,8 cm dan tinggi 11,8 cm. untuk model mekaniknya bisa dilihat pada **Gambar 2**.



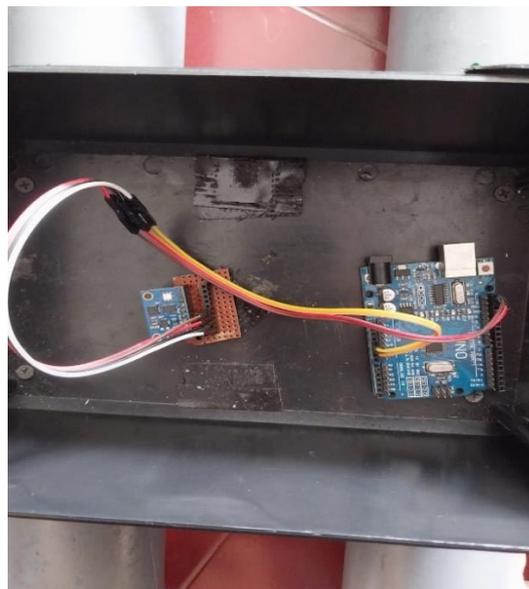
**Gambar 2.** Mekanik Dengan Model *Catamaran Ship*.

### Sensor

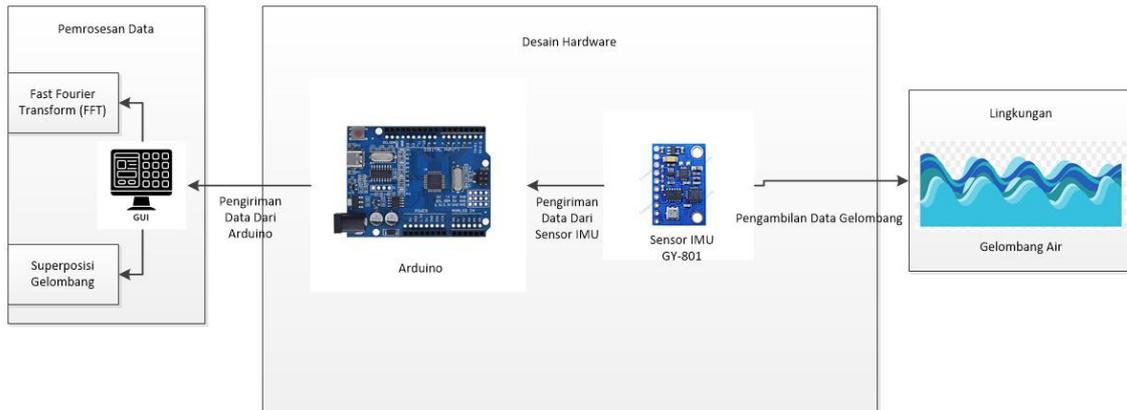
Sensor yang digunakan dalam pembacaan ketinggian gelombang air antara lain, Sensor IMU GY-801 sebagai sensor yang membaca pergerakan air, mikroprosesor Arduino sebagai tempat pemrosesan data yang ditangkap oleh sensor IMU dan dikirim kekomputer sebagai visual pembacaan data. Ada penelitian yang dilakukan oleh (Benetazzo *et al.*, 2012) menunjukkan sistem berbasis IMU dapat membaca pergerakan gelombang secara akurat. Penelitian yang dilakukan oleh (Liu *et al.*, 2020) mengevaluasi metode dan tingkat akurasi penggunaan sensor accelerometer 6 dimensi. Mereka menjelaskan bahwa dengan menggunakan accelerometer 6 dimensi memberikan hasil tingkat akurasi dalam pengukuran ketinggian gelombang laut

sebesar 37.5% lebih akurat dibandingkan dengan accelerometer yang dimensinya lebih rendah.

Studi yang dilakukan oleh (Bagus Widyo Astomo *et al.*, 2023) menunjukkan bahwa sensor IMU GY-955 sangat menjanjikan untuk diterapkan sebagai sensor pengukur gelombang dalam aplikasi kelautan. Sensor tersebut dapat membantu sistem melakukan kalibrasi sensor secara berkala untuk meminimalkan kesalahan pembacaan akibat drift dan noise. Penelitian yang dilakukan sekarang menggunakan sensor GY-801 yang juga memiliki 9-Axis tetapi lebih murah dan akurasiya juga menyerupai Gy-955. Rangkaian sensor bisa dilihat pada **Gambar 3** dan diagram sistemnya bisa dilihat pada **Gambar 4**.



**Gambar 3.** Rangkaian Sensor IMU GY-801.



Gambar 4. Diagram Sistem.

### Pemrosesan Data

Pengumpulan data ini dilakukan di wave generator yang telah disediakan oleh laboratorium. Data yang diambil untuk ketinggian gelombang air dihasilkan dari dorongan gerak maju-mundur sebuah papan yang digerakan oleh motor dan diatur kecepatannya. Pada saat pembacaan data gelombang air, sensor IMU membaca pergerakan gelombang air dan data sensor diproses didalam Arduino untuk mendapatkan data mentah. Data mentah dari sensor dikirimkan ke komputer untu diproses menggunakan FFT dan superposisi gelombang. Tahapan ini penting untuk mengubah sinyal sensor menjadi bentuk data yang dapat dianalisis lebih dalam berdasarkan satuan, seperti frekuensi dan amplitudo gelombang (Bentley, 2005).

### Filtering

Sebelum melakukan analisis lebih lanjut, data mentah perlu dibersihkan dari noise. Filtering merupakan salah satu metode yang dilakukan untuk meningkatkan akurasi dalam perhitungan khususnya pada perhitungan domain frekuensi. Pada penelitian oleh (Belega & Petri, 2021) teknik noise-filtering yang digunakan dalam FFT sangat mempengaruhi pada pembacaan gelombang yang dihasilkan, dengan begitu akurasi pembacaan bisa terlihat. Noise filtering dilakukan dengan metode interpolasi linier yang dapat diterapkan untuk mengurangi kesalahan yang disebabkan oleh data nol dalam pengukuran gelombang (Greaves & Iglesias, 2018). Ini adalah salah satu hal terpenting dalam penelitian ini karena sebelum menerapkan FFT dan analisis superposisi gelombang, diperlukan data yang akurat agar tidak terjadi kesalahan pembacaan frekuensi domain.

### Fast Fourier Transfrom (FFT)

Setelah data mentah difilter, maka perubahan dari sinyal time domain ke frekuensi domain menggunakan fast fourier transform bisa dilakukan. Metode ini dilakukan untuk menganalisi komponen frekeunsi yang terdapat pada gelombang air. Penelitian yang dilakukan oleh (Christou & Ewans, 2014) dan (Voelz, 2011) menekankan pentingnya metode analisis gelombang seperti FFT untuk pemrosesan data khususnya untuk mencari frekuensi dominannya.

### Superposisi Gelombang

Setelah menemukan hasil FFT langkah selanjutnya yaitu mencari superposisi gelombang untuk mengetahui dari gelombang acak tersebut ada berapa banyak gelombang-gelombang reguler yang didapatkan. (Holthuijsen, 2010) dan (Djatkiko, 2019) meninjau pembacaan perilaku dan teknik pengukuran yang luas terhadap gelombang acak menggunakan analisis fourier dan juga superposisi gelombang terhadap gelombang acak tetapi hanya digunakan dalam jangka pendek.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini dimulai dengan pengumpulan data mentah dari sensor IMU GY-801. Gelombang air dihasilkan dan diperoleh dari gerakan maju-mundur papan yang didorong menggunakan motor yang diatur frekuensinya ke 25 Hz sehingga nilai ketinggian gelombang antara 1 cm s/d 4 cm. Untuk mendeteksi ketinggian gelombang yang dihasilkan digunakan sensor IMU GY-801 dengan memanfaatkan data mentah dari akselerometer sumbu Z yang mempresentasikan nilai heave dari sensor IMU. Nilai ini yang digunakan untuk memantau ketinggian permukaan air dalam

berbagai macam kondisi air (Patra & Jena, 2014). Data yang diperoleh adalah nilai percepatan sesaat di mana nilai ini kemudian dianalisis dengan membandingkan data saat ini dengan data sebelumnya. Hasil dari analisis ini digunakan sebagai dasar untuk menentukan nilai ketinggian gelombang. Selain itu, penelitian oleh (Abankwa *et al.*, 2015) menunjukkan bahwa sensor IMU dapat digunakan secara baik untuk merekam perubahan dinamika yang kompleks dalam lingkungan perairan. Mereka menyatakan bahwa IMU memiliki sensitivitas yang cukup tinggi untuk menangkap variasi gerakan akibat interaksi antara permukaan air dengan struktur apung, termasuk fluktuasi kecil dalam studi tentang gelombang air. Hal ini memperkuat validitas penggunaan sensor IMU dalam eksperimen laboratorium untuk pengukuran elevasi gelombang air.

Untuk data pengukuran selanjutnya, dapat diselesaikan dengan menggunakan pendekatan pemrosesan sinyal menggunakan metode *Fast Fourier Transform* (FFT) dan juga metode superposisi gelombang sebagai dekomposisi sinyal domain waktu. Data hasil pengukuran tersebut kemudian disimpan dalam bentuk file CSV dan dijadikan sebagai sinyal dalam domain waktu. Sinyal tersebut kemudian dianalisis lagi dengan

mentransformasikan ke dalam domain frekuensi dengan menggunakan FFT sesuai dengan yang telah dijelaskan pada persamaan. Berdasarkan domain frekuensi ini, sinyal individual kemudian dibentuk dengan menggunakan pendekatan superposisi gelombang. Menurut (Djatkiko, 2019) secara matematis, karakteristik dari gelombang laut merupakan sinyal acak yang dapat direpresentasikan dalam bentuk deret Fourier yang terdiri dari beberapa komponen periodik dengan frekuensi dengan kelipatan dari frekuensi dasar  $\omega_n$ .

Setelah memperoleh representasi dari sinyal individual ini, langkah selanjutnya adalah menentukan bentuk gelombang terbaik dengan menggunakan metode *Fourier Cosine Series* dalam menentukan estimasi energi. Selanjutnya adalah menghitung kecepatan gelombang dan menganalisis dengan menggunakan beberapa metode diantaranya *wave speed calculation*, metode FFT, *peak tracking method*, dan *Doppler shift method*. Perbandingan hasil metode ini dilakukan untuk mengevaluasi keakuratan estimasi kecepatan gelombang serta energi potensial yang dapat dioptimalkan sebagai sumber energi terbarukan khususnya untuk offshore. Hasil dari pengambilan data yang dilakukan dalam skala laboratorium dapat dilihat pada **Tabel 1**.

**Tabel 1.** Pengambilan Data Gelombang Air.

| No | Z-Axis | Compared Data (cm) |
|----|--------|--------------------|
| 1  | 10.43  | 0                  |
| 2  | 9.65   | -1                 |
| 3  | 10.16  | 0                  |
| 4  | 9.22   | -1                 |
| 5  | 9.1    | 0                  |
| 6  | 10.67  | 1                  |
| 7  | 10.75  | 0                  |
| 8  | 6.86   | -4                 |
| 9  | 10.36  | 3                  |
| 10 | 10.9   | 0                  |

Untuk mendapatkan perbandingan data antar waktu, dapat menggunakan rumus differensial sederhana pada persamaan 1:

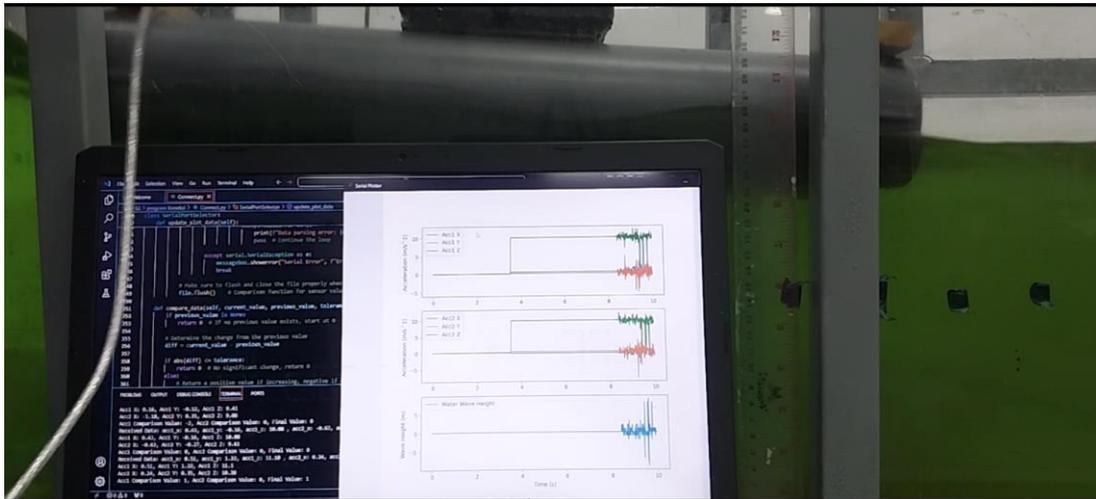
$$diff = current\_value - previous\_value \dots\dots\dots (1)$$

Untuk melihat perbandingannya bisa divisualkan secara manual melalui data yang dapat dilihat pada GUI yang sudah dibuat dengan posisi kotak hitam berada dan penggaris yang diletakkan diluar kaca sebagai pembacaan posisi kotak hitam. Melalui pembacaan ini, perbandingan data bisa diamati posisinya secara real-time. Proses perbandingan visual secara manual dapat

memberikan fungsi pembacaan yang meningkatkan presisi pengukuran serta memberikan validasi awal dan mempermudah pemrosesan data dengan metode FFT dan superposisi gelombang (Kurnia *et al.*, 2021). Perbandingan hasil data yang dilakukan secara manual visual bisa dilihat pada **Gambar 4**. Selain sebagai alat bantu validasi visual, pendekatan ini juga berfungsi sebagai metode kalibrasi awal sebelum data mulai dimasukkan kedalam perumusan analisis lebih lanjut. Metode pengamatan langsung tersebut mendukung interpretasi data dengan memberikan konteks spasial terhadap fluktuasi nilai numerik yang ditampilkan oleh sensor.

Dengan dilakukannya observasi langsung akan memberikan kualitas hasil pengukuran yang dapat disesuaikan secara terperinci dan

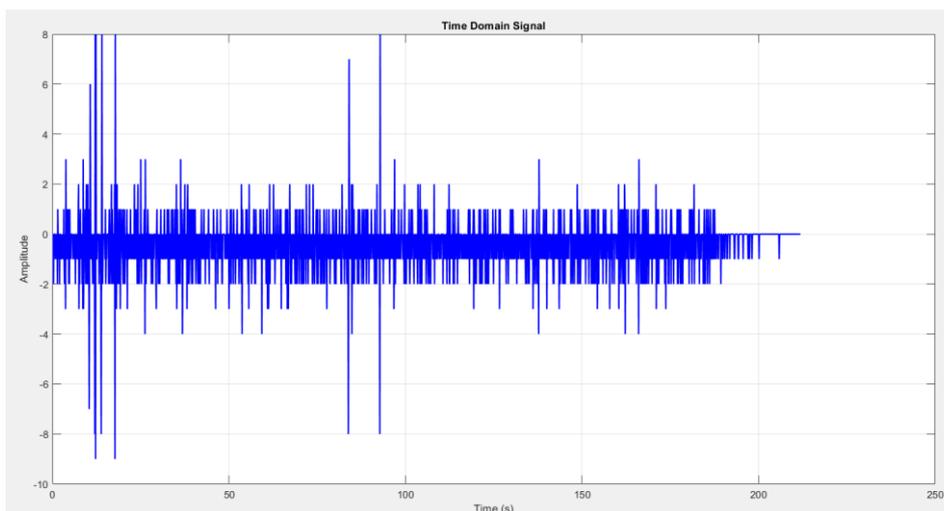
menghasilkan pembacaan yang lebih akurat terhadap dinamika permukaan air yang sedang diamati.



Gambar 4. Pengukuran Gelombang Air Di Wave Generator.

Pada hasil persamaan 1 juga diberikan nilai tolerance untuk menghindari perbedaan nilai yang berlebihan dan menjaga kestabilan perbandingan data antar waktu. *Tolerance* yang digunakan saat ini sebesar 0.2 yang fungsinya dari nilai tersebut adalah untuk mengatur tingkat sensitivitas pembacaan terhadap pembacaan data sekaligus juga sebagai stabilitas terhadap minor noise yang dapat meredam noise kecil saat pembacaan data berlangsung. Dengan adanya toleransi ini, sistem dapat menampilkan data yang stabil dan tidak terlalu sensitif terhadap fluktuasi yang sangat kecil atau tidak signifikan. Hal ini penting

untuk memastikan bahwa hanya perubahan yang relevan secara tercatat dan diproses lebih lanjut, terutama dalam konteks pengukuran gelombang air yang memiliki dinamika yang kompleks dan rentan terhadap gangguan lingkungan sekitar. Selain itu, toleransi ini memungkinkan sensor untuk beroperasi dalam rentang pengukuran yang lebih realistis dan akurat. Hasil data yang telah didapatkan dari *compared data* kemudian diubah menjadi bentuk *time domain signal* yang diperlihatkan pada Gambar 5 sebagai dasar untuk analisis frekuensi dan identifikasi karakteristik gelombang selanjutnya.



Gambar 5. Time Domain Signal.

Sinyal yang didapatkan dari proses pengambilan data sensor telah berbentuk dalam domain waktu, namun data tersebut masih perlu difilter untuk meningkatkan kualitas

gelombang yang diperoleh. Salah satu isu utama yang perlu ditangani adalah keberadaan nilai nol pada sinyal domain waktu. Jika tidak dapat diatasi dapat memberikan bias dalam

analisa data dan akan mempengaruhi dalam pembacaan data. Nilai nol ini sering kali merupakan hasil dari kesalahan sementara dalam pembacaan sensor, sehingga tidak mewakili kondisi yang sebenarnya pada pembacaan sinyal. Untuk mengatasi hal ini, dengan menggunakan metode interpolasi linier yang diterapkan sebelum dilakukan transformasi fourier (FFT) yang dapat mengurangi nilai nol dalam sinyal domain waktu. Interpolasi linier berfungsi untuk menghapus nilai yang tidak diperlukan atau gangguan dalam sistem pengukuran dengan mengisi celah atau titik kosong pada data dengan nilai yang berada disekitar titik tersebut.

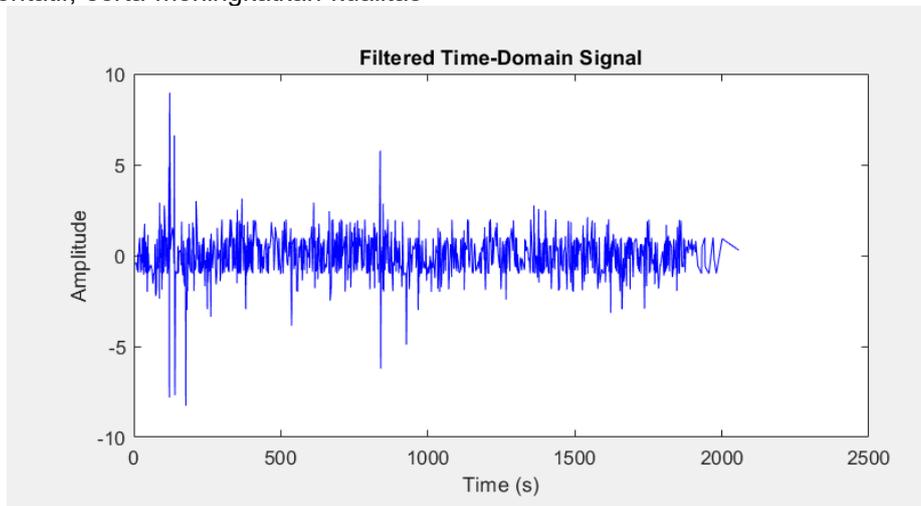
Sehingga akan membantu menghasilkan sinyal yang lebih bagus dan akurat agar dapat digunakan lebih lanjut untuk ekstrak energi maksimum. Pendekatan ini adalah sebuah metode yang memberikan informasi tentang bagaimana teknik filtering untuk pemrosesan data yang lebih bagus, seperti penyaringan dan FFT, dapat diterapkan untuk meningkatkan keandalan pengukuran gelombang IMU (Benbouzid *et al.*, 2020). Hasil dari proses interpolasi linier dapat ditampilkan pada **Tabel 2** yang menunjukkan berkurangnya jumlah nilai nol dan membaiknya struktur sinyal yang diperlihatkan.

**Tabel 2.** Interpolation Data.

| <i>Filtered signal and interpolation Linier</i> | <b>Data</b> |
|---|-------------|
| <i>Number of zeros before interpolation</i>     | 1077        |
| <i>Number of zeros after interpolation</i>      | 30          |
| <i>Filtered amplitude size</i>                  | 1042        |
| <i>Filtered time size</i>                       | 1042        |
| <i>Number of points after filtering</i>         | 1042        |

Berdasarkan hasil dari analisa data diatas, sebelum dilakukan interpolasi linier jumlah nilai 0 didalam time domain sebanyak 1077 data. Setelah diterapkan metode interpolasi linier didalam time domain jumlah nilai 0 berkurang secara signifikan menjadi 30 data. Pengurangan nilai 0 pada sinyal domain waktu ini memberikan kontribusi terhadap pembentukan gelombang lebih harmonis, halus dan representatif, serta meningkatkan kualitas

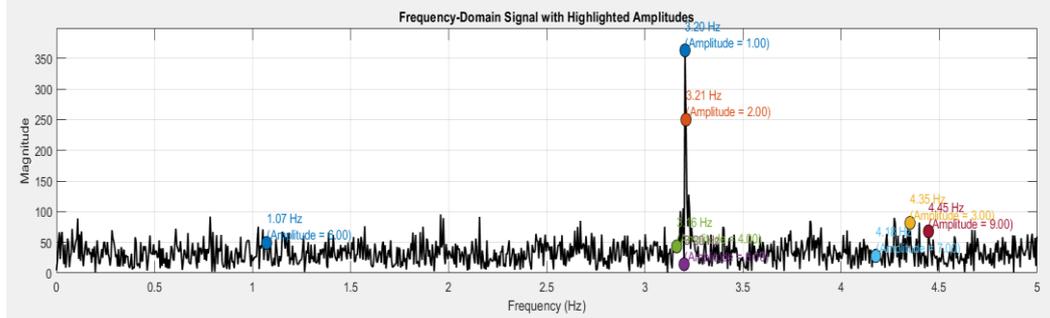
sinyal secara keseluruhan. Jumlah total data yang terbentuk setelah melakukan interpolasi linier terdapat jumlah data sebanyak 1042 data, yang kini siap untuk dianalisis menggunakan metode lanjutan seperti FFT dan superposisi gelombang. Hasil sinyal time domain yang sudah difilter setelah melalui proses interpolasi pada sinyal domain waktu dapat dilihat pada **Gambar 6**.



**Gambar 6.** Filtered Time Domain Signal.

Setelah dilakukan proses filtering pada sinyal time domain dengan metode interpolasi linier, langkah selanjutnya adalah mentransformasikan sinyal domain waktu ke bentuk sinyal domain frekuensi. Transformasi ini bertujuan untuk memperoleh bentuk frekuensi dari sinyal domain waktu dan

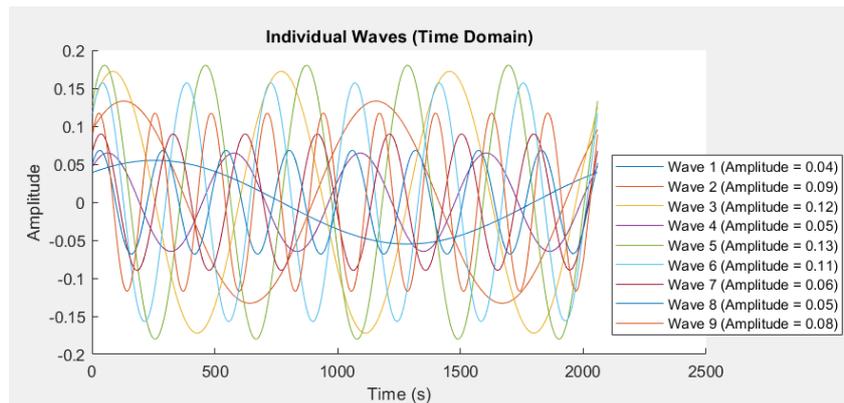
mengidentifikasi amplitudo yang didapatkan pada setiap komponen frekuensinya. Analisa dalam domain frekuensi memberikan pemahaman terhadap karakteristik bentuk gelombang air. Hasil domain frekuensi bisa dilihat pada **Gambar 7**.



Gambar 7. Frequency Domain Signal.

Pada sinyal didalam domain frekuensi, dapat diamati bahwa amplitudo tertinggi muncul pada frekuensi 3,2 Hz. Amplitudo yang terlihat pada sinyal domain waktu juga ditampilkan secara jelas didalan domain frekuensi, sehingga dapat mengidentifikasi frekuensi dominan dengan akurasi yang lebih tinggi. Berdasarkan hasil analisis, amplitude maksimum yang dicapai pada frekuensi dominan tersebut berada di amplitudo 1 cm.

Metode optimisasi yang diterapkan dalam proses ini bertujuan untuk meningkatkan akurasi pengukuran dan dapat mengestimasi terhadap berbagai karakteristik gelombang yang lebih tepat. Pendekatan ini diperkuat melalui penggunaan metode superposisi gelombang individual secara representative (Ning & Ding, 2022). Untuk mengetahui hasil rekonstruksi gelombang individual dengan metode superposisi bisa ditampilkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Gelombang Individual.

Gelombang - gelombang individual yang terdeteksi ini ialah data yang didekomposisi berasal dari sinyal domain waktu yang sudah difilter oleh interpolasi linier. Sinyal domain waktu tersebut dipecah menjadi beberapa komponen individual untuk mengidentifikasi data potensi dari masing masing gelombang air. Dengan menggunakan superposisi gelombang bisa melihat seberapa banyak gelombang yang terdapat pada gelombang acak dari sinyal time domain yang telah difilter.

Setelah mengetahui jumlah amplitudo yang teridentifikasi diketahui maka bisa didefinisikan sebagai  $n$ , serta rentang waktu total pengamatan didefinisikan sebagai  $T_H$ , maka setiap komponen gelombang dapat dipresentasikan dalam bentuk frekuensi sudut  $\omega_n$ . Nilai ini dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2:

$$\omega_n = \frac{2\pi n}{T_H} \left( \frac{rad}{det} \right) \text{ untuk } n = 1,2,3,\dots,\infty \dots \dots (2)$$

Persamaan 2 menjadi dasar dalam mempresentasikan sinyal sebagai deret fourier dalam proses analisis spektrum gelombang air.

Untuk mendapatkan masing masing komponen gelombang individual diperlukan perhitungan terhadap nilai koefisien  $A_n$  dan  $B_n$ . Nilai-nilai ini adalah komponen dasar yang digunakan untuk membuat gelombang sinusoidal dan kosinusoidal yang mempresentasikan gelombang laut dalam domain waktu. Koefisien  $A_n$  dan  $B_n$  dihitung berdasarkan frekuensi sudut  $\omega_n$  dan  $dt$  sebagai selang waktu dalam proses pengambilan sinyal. Nilai-nilai ini digunakan dalam pendekatan deret fourier untuk membentuk sinyal individual. perumusan matematis untuk menghitung komponen dasar

pada nilai  $A_n$  dan  $B_n$  dituliskan persamaan 3 dan persamaan 4:

$$A_n = \frac{2\pi}{T_H} \int_0^H \zeta(t) \cos(\omega_n t) dt \dots\dots\dots (3)$$

$$B_n = \frac{2\pi}{T_H} \int_0^H \zeta(t) \sin(\omega_n t) dt \dots\dots\dots (4)$$

Dimana  $\zeta(t)$  merupakan elevasi gelombang karena pada perhitungan pertamaelevasi gelombang masih dianggap sebagai 0,  $\omega_n$  adalah frekuensi sudut pada persamaan 2 yang menggunakan komponen ke-n sebagai penentu jumlah gelombang sinus yang gunakan sebagai jumlah berapa banyak gelombang individual ditampilkan, dan  $T_H$  adalah total waktu pada sinyal domain waktu. Koefisien koefisien ini penting dalam pembentukan sinyal gelombang individual yang berdasarkan dari data sinyal yang sudah difilter. Setelah menemukan nilai  $A_n$  dan  $B_n$  langkah selanjutnya adalah menghitung elevasi gelombang  $\zeta(t)$  menggunakan persamaan 5 :

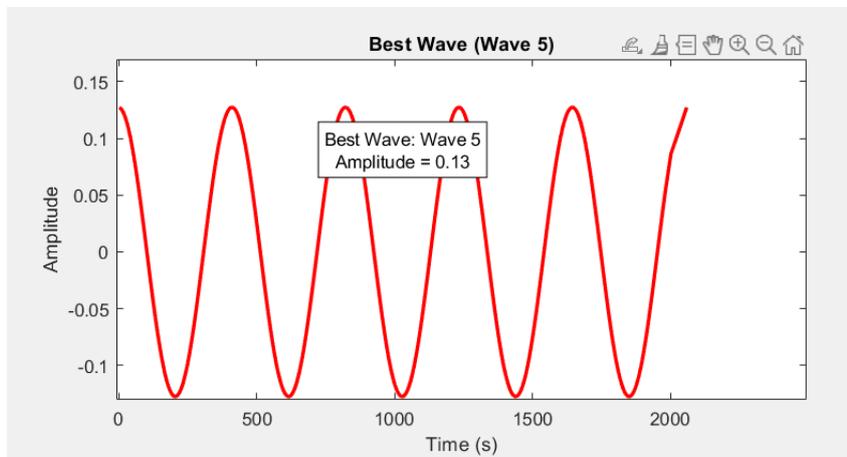
$$\zeta(t) = \sum_{n=1}^N \zeta_{0n} \cos(\omega_n t) + \sin(\omega_n t) \dots\dots\dots (5)$$

Dengan nilai amplitudo individual  $\zeta_{0n}$  dihitung melalui persamaan 6:

$$\zeta_{0n} = \sqrt{(A_n^2 + B_n^2)} \dots\dots\dots (6)$$

Nilai dari  $\zeta(t)$  yang berada pada persamaan 5 digunakan sebagai amplitudo untuk masing-masing komponen gelombang pada tiap ke-n yang dapat dipresentasikan dalam bentuk gelombang individual, yang hasilnya bisa ditampilkan pada **Gambar 5**.

Setelah memperoleh bentuk gelombang individual dari elevasi gelombang masing-masing komponen maka langkah selanjutnya adalah mengidentifikasi gelombang yang memiliki amplitudo tertinggi yang merepresentasikan ketinggian maksimum. Gelombang dengan karakteristik amplitudo terbesar dianggap sebagai komponen utama yang berkontribusi paling signifikan terhadap energi total gelombang. Proses ini bertujuan untuk menentukan gelombang yang paling tinggi sebagai basis perhitungan energi potensial dari system gelombang. Hasil identifikasi gelombang ini dapat dilihat pada **Gambar 8** dan **Gambar 9**.



**Gambar 9.** Gelombang terbaik yang diambil dari gelombang individual.

Pada **Gambar 9** menunjukkan bahwa setelah gelombang acak difilter, data yang terurai tersebut menjadi beberapa bagian gelombang sinusoidal dapat dicari menggunakan metode *fourier cosine series*. Pendekatan ini digunakan untuk mengidentifikasi energi didapatkan diantara gelombang-gelombang individual yang terbentuk. Dari **Gambar 8** yang ditampilkan, bisa dilihat terdapat cukup banyak gelombang yang dihasilkan berdasarkan jumlah amplitudo yang teridentifikasi dari sinyal domain waktu yang telah difilter. Untuk itu diperlukan sebuah cara untuk mencari dari pecahan gelombang

tersebut menjadi gelombang yang terbaik supaya bisa menjadi acuan untuk mendapatkan energi yang diinginkan.pada **Gambar 9** memperlihatkan bahwa dalam 2000 detik gelombang yang terbaik ditunjukkan pada bagian Wave 5 dengan amplitudo sebesar 0.13, dengan begitu dalam sinyal time domain amplitudo 1 cm mampu menghasilkan sebanyak 0.13 rad/s. Untuk menentukan gelombang terbaik dari hasil dekomposisi tersebut bisa menggunakan dengan persamaan 7:

$$\omega_n = \cos\left(\frac{2\pi n}{T_H} t\right) \dots\dots\dots (7)$$

Pada persamaan 7,  $n$  mempresentasikan jumlah maksimal dari nilai  $\zeta(t)$  per amplitude yang berada pada persamaan 5 dan dicari nilai tertinggi dari nilai  $\zeta(t)$ . Dengan mengidentifikasi nilai  $\zeta(t)$  yang paling signifikan maka hasil sinyal bisa menjadi acuan untuk gelombang yang terbaik. Dengan begitu pendekatan ini memungkinkan analisis gelombang berbasis FFT dan superposisi gelombang untuk mengevaluasi dan mengetahui gelombang dominan yang paling optima untuk akan dijadikan sebagai pendekatan terhadap energi gelombang air (Samad et al., 2021).

Setelah menemukan energi dari tiap gelombang individu maka Langkah selanjutnya yaitu mencari kecepatan gelombang air tersebut. Untuk mencari kecepatan gelombang air. Untuk tujuan ini, digunakan beberapa metode yang akan diberikan yaitu *wave speed calculation*, *FFT method*, *peak tracking method* dan *doppler shift method*. Dengan menggunakan metode tersebut yang diterapkan pada sinyal time domain yang sudah difilter dapat memperoleh hasil kecepatan gelombang yang akurat.

Metode *wave speed calculation* untuk menemukan kecepatan gelombang air dengan menggunakan persamaan 8:

$$v = \frac{\lambda}{T} \dots\dots\dots (8)$$

Dimana  $\lambda$  adalah Panjang gelombang dan  $T$  adalah periode gelombang. Persamaan 8 memberikan estimasi langsung terhadap kecepatan gelombang air berdasarkan hasil percobaan gelombang sebelumnya.

Metode *Fast Fourier Transform (FFT)* juga digunakan untuk menentukan kecepatan gelombang dengan menggunakan persamaan 9:

$$v = f_{dominant} \times \lambda \dots\dots\dots (9)$$

Dalam persamaan 9,  $f_{dominant}$  adalah frekuensi dominan pada nilai di FFT sedangkan  $\lambda$  adalah panjang gelombang. Nilai Frekuensi dominan dapat diidentifikasi dari spektrum frekuensi hasil FFT yang terdapat pada **Gambar 6**. Dengan menggunakan frekuensi akan mengetahui hasil kecepatan gelombang air berdasarkan frekuensi yang dominant. Dengan mengalikan frekuensi dominan dengan panjang gelombang, diperoleh estimasi kecepatan gelombang air.

Berdasarkan hasil analisis FFT, dapat diketahui nilai frekuensi dominan terdeteksi di 3.2 Hz. Set nilai frekuensi dominannya diketahui, proses selanjutnya adalah mengalikannya dengan panjang gelombang  $\lambda$  untuk memperoleh kecepatan permukaan gelombang (Tian, 2014).

Metode *peak tracking method* digunakan untuk menentukan kecepatan permukaan gelombang dengan menggunakan persamaan 10:

$$v = \frac{\Delta_x}{\Delta_t} \dots\dots\dots (10)$$

$\Delta_x$  adalah persamaan yang mengukur jarak antar puncak dalam time domain dan bisa ditulis dengan persamaan 11:

$$\Delta_x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-1} (t_{p(i+1)} - t_{p(i)}) \dots\dots\dots (11)$$

$t_{p(i)}$  adalah waktu pada puncak ke- $i$  sedangkan  $N$  adalah jumlah puncak dari amplitude yang sudah difilter.

$\Delta_t$  sendiri adalah persamaan yang mengukur waktu antar puncak dalam detik, dengan memperhitungkan indeks sampel. Persamaan  $\Delta_t$  bisa dilihat 12:

$$\Delta_t = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-1} \left( \frac{p(i+1) - p(i)}{F_s} \right) \dots\dots\dots (12)$$

$p(i)$  adalah indeks puncak ke- $i$  sedangkan  $F_s$  adalah pengambilan frekuensi sampling.

Dengan mengekstrak tiap puncak dari sinyal amplitude yang difilter, maka dapat mengetahui hasil kecepatan gelombang air secara berkelanjutan. Kecepatan gelombang dengan mengekstrak puncak gelombang akan memberikan kecepatan permukaan air secara terus menerus (Dolcetti et al., 2024).

Metode *doppler shift method* dapat digunakan untuk memperkirakan kecepatan gelombang melalui persamaan 13:

$$v_{doppler} = \left| \left( \frac{f_{shifted}}{f} - 1 \right) \times v \right| \dots\dots\dots (13)$$

Dalam persamaan 13 terdapat  $f_{shifted}$  yang merupakan frekuensi hasil pengukuran yang terjadi akibat pergeseran dari efek doppler. Dengan mengetahui pergeseran didalam frekuensi maka akan terjadi shifted dalam gelombang tersebut (Li et al., 2024 dan Sediono, 2013).

Nilai  $f_{shifted}$  bisa dicari menggunakan persamaan 14:

$$f_{shifted} = f \times \left( \frac{v + v_0}{v - v_0} \right) \dots \dots \dots (14)$$

V pada persamaan diatas ialah kecepatan gelombang dari persamaan *wave speed calculation* dan  $v_0$  adalah kecepatan awal gelombang.

Dengan mengetahui nilai kecepatan gelombang  $v$  maka pergeseran frekuensi dapat mempengaruhi terhadap kecepatan gelombang karena setiap kali gelombang naik maka akan terjadi pergeseran gelombang yang menyebabkan pergeseran antar gelombang air yang bisa menyebabkan kecepatan gelombang tersebut. Hasil dari persamaan yang diberikan dapat dilihat pada **Tabel 3**.

**Tabel 3.** Hasil kecepatan gelombang air tiap metode yang digunakan.

| Metode yang digunakan         | m/s  |
|-------------------------------|------|
| <i>wave speed calculation</i> | 1.00 |
| <i>FFT method</i>             | 3.00 |
| <i>peak tracking method</i>   | 0.89 |
| <i>doppler shift method</i>   | 0.02 |

Berdasarkan hasil perhitungan kecepatan gelombang air yang ditampilkan pada **Tabel 3**, dapat disimpulkan bahwa kecepatan gelombang yang dihasilkan oleh *wave generator* dalam skala laboratorium tergolong relatif kecil. Selain itu, jika dibandingkan melalui berbagai metode pengukuran yang digunakan seperti *wave speed calculation*, *peak tracking method*, *doppler shift method* dan dibandingkan dengan *FFT method* memiliki perbedaan kecepatan maksimum yang tercatat hanya memiliki perbedaan sebesar 2 m/s. *doppler shift method* memiliki nilai yang lebih kecil yaitu 0.02 m/s karena ada beberapa faktor. Pertama, pergeseran frekuensi yang terdeteksi sangat kecil yaitu sebesar 0.01 Hz dari frekuensi sumber yang sebesar 3.20 Hz, yang menyebabkan hasil kecepatan air yang rendah saat dikalikan dengan *wave speed calculation* dengan nilai sebesar 1.00 m/s. Selain itu, metode ini juga sangat sensitif terhadap resolusi frekuensi dan arah datang gelombang air. Jika sudut datang tidak seraha dengan sensor, maka hanya sebagian kecil komponen kecepatan yang terdeteksi. Dalam hal ini metode yang dapat diandalkan dalam mencari kecepatan gelombang air yaitu *FFT method* dan *peak tracking method* karena membaca pergerakan gelombang air atau puncak-puncaknya secara keseluruhan, sehingga menghasilkan nilai yang besar. Perbedaan ini menunjukkan bahwa variasi antar metode tidak terlalu signifikan, sehingga metode-metode yang digunakan dalam penelitian ini dinilai cukup bagus dan akurat dalam mengukur kecepatan gelombang air dalam skala laboratorium.

**KESIMPULAN DAN SARAN**

Metode FFT terbukti keefektifitas menganalisis gelombang air dengan keakuratan error

sebesar 2% dalam pembacaan gelombang air. Proses interpolasi linier digunakan untuk meningkatkan kualitas sinyal domain waktu dan saat digunakan keefektifitasnya mencapai 97% peningkatan kualitas dalam pembacaan sinyal. Untuk kecepatan gelombang air memerlukan 4 metode supaya dapat dilakukan perbandingan dan hasilnya terjadi deviasi sebesar 2 m/s. Sistem ini sangat layak dikembangkan sebagai alat untuk memonitoring ketinggian gelombang air dan kecepatan air skala pesisir pantai yang murah dan portable untuk para nelayan. Disarankan untuk memperbaiki akurasi dan adaptasi dalam kondisi gelombang yang lebih kompleks.

**DAFTAR PUSTAKA**

Abankwa, N. O., Johnston, S. J., Scott, M., & Cox, S. J. (2015). Ship motion measurement using an inertial measurement unit. *2015 IEEE 2nd World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*, 375–380. <https://doi.org/10.1109/WF-IoT.2015.7389083>

Bagus Widyo Astomo, R., Kurniawati, I., Mahmudah, A., & others. (2023). Rancang Bangun Instrumen Pengukur Tinggi Gelombang Permukaan Laut Menggunakan Sensor IMU GY955. *Rancang Bangun Instrumen Pengukur Tinggi Gelombang Permukaan Laut Menggunakan Sensor IMU GY955*, 4(1), 26–36. <https://doi.org/10.31328/jasee.v4i01.277>

Belega, D., & Petri, D. (2021). Fast procedures for accurate parameter estimation of sine-waves affected by noise and harmonic distortion. *Digital Signal Processing*, 114, 103035. <https://doi.org/10.1016/j.dsp.2021.103035>

- Benbouzid, M., Amirat, Y., & Elbouchikhi, E. (2020). *Marine tidal and wave energy converters: Technologies, conversions, grid interface, fault detection, and fault-tolerant control*. MDPI.
- Benetazzo, A., Fedele, F., Gallego, G., Shih, P. C., & Yezzi, A. (2012). Offshore stereo measurements of gravity waves. *Coastal Engineering*, 64, 127–138. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2012.01.007>
- Bentley, J. P. (2005). *Principles of measurement systems*. Pearson education.
- Christou, M., & Ewans, K. (2014). Field measurements of rogue water waves. *Journal of Physical Oceanography*, 44(9), 2317–2335. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-13-0199.1>
- Djatmiko, E. (2019). *Perilaku dan Operabilitas Bangunan Laut di Atas Gelombang Acak*.
- Dolcetti, G., Krynkina, A., Alkimi, M., Cuenca, J., De Ryck, L., Sailor, G., Muraro, F., Tait, S. J., & Horoshenkov, K. V. (2024). Reconstruction of the Frequency-Wavenumber Spectrum of Water Waves With an Airborne Acoustic Doppler Array for Noncontact River Monitoring. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 62, 1–14. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2024.3358672>
- Greaves, Deborah., & Iglesias, Gregorio. (2018). *Wave and tidal energy*. John Wiley & Sons Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781119014492>
- Hereman, W. (2013). *Shallow Water Waves and Solitary Waves*. <http://arxiv.org/abs/1308.5383>
- Holthuijsen, L. H. (2010). *Waves in oceanic and coastal waters*. Cambridge university press.
- Khedkar, K., Nangia, N., Thirumalaisamy, R., & Bhalla, A. P. S. (2020). The inertial sea wave energy converter (ISWEC) technology: Device-physics, multiphase modeling and simulations. *ArXiv Preprint ArXiv:2005.06108*. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.108879>
- Kurnia, M. H., Saputra, R. E., & Setianingsih, C. (2021). High-Low Detection of Sea Water Waves With Multi-Sensor System Based on IoT. *E-Proceeding Eng*, 8(5), 6175–6182.
- Li, J., Qian, Z. W., Hong, D. Y., & Zhai, J. S. (2024). Precise and low-complexity method for underwater Doppler estimation based on acoustic frequency comb waveforms. *Frontiers in Marine Science*, 11. <https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1365095>
- Liu, Y., Wang, X., You, J., & Chen, C. (2020). Ocean Wave Buoy Based on Parallel Six-Dimensional Accelerometer. *IEEE Access*, 8, 29627–29638. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2971711>
- Mai, T. L., Vo, A. K., Cho, A., Yoon, H. K., & others. (2024). Experimental investigation on wave characteristics due to interference of catamaran demi-hulls in waves. *International Journal Of Naval Architecture And Ocean Engineering*, 16, 100594. <https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2024.100594>
- Mayon, R., Ning, D., Ding, B., & Sergiienko, N. Y. (2022). Wave energy converter systems—status and perspectives. In *Modelling and Optimization of Wave Energy Converters* (pp. 3–58). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003198956-1>
- Ning, D., & Ding, B. (2022). *Modelling and optimization of wave energy converters*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003198956>
- Pandey, J. (2017). *Manoeuvring and Guidance of Catamaran Wave Adaptive Modular Vessel*.
- Patra, S. K., & Jena, B. K. (2014). *Inter-comparison of wave measurement by accelerometer and GPS wave buoy in shallow water off Cuddalore, east coast of India*.
- Samad, A., Sannasiraj, S. A., Sundar, V., & Halder, P. (2021). *Ocean wave energy systems: Hydrodynamics, power takeoff and control systems* (Vol. 14). Springer Nature. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-78716-5>
- Sediono, W. (2013). *Method of Measuring Doppler Shift of Moving Targets Using FMCW Maritime Radar*. <https://doi.org/10.1109/TALE.2013.6654465>
- Tian, L. (2014). *Ocean wave simulation by the mix of FFT and Perlin Noise*.
- Voelz, D. G. (2011). Computational fourier optics: a MATLAB tutorial. (*No Title*), 51. <https://doi.org/10.1117/3.858456>