

# ANALISIS KELAYAKAN TEKNIS GENERATOR BLDC BERKECEPATAN RENDAH UNTUK PEMBANGKIT ENERGI GELOMBANG LAUT DI PERAIRAN PANTAI MALALAYANG

Arnold Robert Rondonuwu<sup>1\*</sup>, Leony Ariesta Wenno<sup>2</sup>, Deitje Sophie Pongoh<sup>3</sup>, Muchdar Patabo<sup>4</sup>, Fanny Doringin<sup>5</sup>, Samsu Tuwongkesong<sup>6</sup>

<sup>1,2,3,4,5,6</sup> Politeknik Negeri Manado; Manado; (0431) 811568

## Keywords:

Generator BLDC; Energi Gelombang Laut; Wave Energy Converter; Kelayakan Teknis; Energi Terbarukan.

## Correspondent Email:

leonywenno@elektro.polimdo.ac.id

**Abstrak.** Energi gelombang laut merupakan sumber energi terbarukan yang berpotensi besar untuk mendukung transisi energi di wilayah kepulauan Indonesia. Penelitian ini menganalisis kelayakan teknis generator Brushless Direct Current (BLDC) berkecepatan rendah sebagai sistem konversi energi gelombang laut di Perairan Pantai Malalayang, Kota Manado, menggunakan data tinggi gelombang periode Januari 2024–Juni 2026. Hasil menunjukkan tinggi gelombang rata-rata 0,263 m (maksimum 0,875 m) dengan power density rata-rata 0,241 kW/m, meningkat hingga 2,13 kW/m pada kondisi maksimum. Pola musiman yang relatif stabil serta tren peningkatan potensi energi dari 2024 ke 2026 mendukung penerapan generator BLDC dengan sistem power take-off (PTO) sederhana. Pantai Malalayang dinilai layak untuk pengembangan pembangkit energi gelombang laut skala kecil-menengah sebagai alternatif energi bersih bagi pesisir Sulawesi Utara.



Copyright © 2026 The Author(s), Published by Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

**Abstract.** Ocean wave energy is a renewable energy source with significant potential to support the energy transition in Indonesia's archipelagic regions. This study analyzes the technical feasibility of a low-speed Brushless Direct Current (BLDC) generator as an energy conversion system for ocean wave energy at Malalayang Coastal Waters, Manado City, using wave height data from January 2024 to June 2026. The results show an average wave height of 0.263 m (maximum 0.875 m) with an average power density of 0.241 kW/m, increasing to 2.13 kW/m under maximum conditions. The relatively stable seasonal pattern and the increasing trend in wave energy potential from 2024 to 2026 support the application of a BLDC generator with a simple power take-off (PTO) system. Malalayang Coast is considered suitable for the development of small- to medium-scale ocean wave energy generation as a clean energy alternative for the coastal areas of North Sulawesi.

## 1. PENDAHULUAN

Transisi menuju energi bersih menjadi salah satu agenda utama di berbagai negara sebagai respons terhadap meningkatnya kebutuhan energi dan dampak penggunaan bahan bakar fosil terhadap perubahan iklim [1]. Indonesia sebagai negara kepulauan memiliki potensi

sumber energi terbarukan yang sangat besar, tidak hanya dari energi surya, angin, dan air, tetapi juga dari energi laut [2]. Di antara berbagai jenis energi laut, energi gelombang merupakan salah satu sumber energi yang memiliki densitas energi tinggi, bersifat relatif stabil, serta tersedia secara berkelanjutan

sehingga berpotensi mendukung penyediaan energi listrik di wilayah pesisir dan pulau-pulau kecil [3],[4]. Meskipun demikian, pemanfaatan energi gelombang laut di Indonesia masih jauh dari optimal apabila dibandingkan dengan negara-negara yang telah lebih dahulu mengembangkan teknologi Wave Energy Converter (WEC) seperti Inggris, Portugal, dan Australia [5],[6].

Perkembangan teknologi konversi energi gelombang dalam dua dekade terakhir menunjukkan peningkatan yang signifikan. Berbagai konfigurasi Wave Energy Converter, seperti Oscillating Water Column, Point Absorber, Oscillating Surge Converter, dan Overtopping Device, telah dikembangkan untuk meningkatkan efisiensi penyerapan energi gelombang [7]. Selain desain mekanik, sistem Power Take-Off (PTO) dan generator listrik merupakan komponen yang sangat menentukan kinerja pembangkit karena berperan langsung dalam mengubah energi mekanik menjadi energi listrik [8]. Oleh sebab itu, pemilihan jenis generator menjadi salah satu aspek penting dalam pengembangan sistem pembangkit energi gelombang laut [3],[4],[9].

Sebagian besar penelitian mengenai pembangkit energi gelombang menggunakan Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) maupun Linear Permanent Magnet Generator karena memiliki efisiensi tinggi pada kondisi gelombang berenergi besar. Namun, kedua jenis generator tersebut umumnya membutuhkan sistem mekanik yang lebih kompleks, dimensi yang besar, dan biaya investasi yang relatif tinggi. Kondisi tersebut menjadikan penerapannya kurang sesuai untuk wilayah pesisir tropis yang didominasi oleh gelombang berenergi rendah. Seiring perkembangan teknologi mesin listrik, generator Brushless Direct Current (BLDC) mulai mendapat perhatian karena memiliki efisiensi tinggi, konstruksi sederhana, torsi awal yang besar, kemampuan beroperasi pada putaran rendah, serta kebutuhan perawatan yang rendah akibat tidak menggunakan sikat (brush). Karakteristik tersebut menjadikan generator BLDC sebagai alternatif yang menjanjikan untuk sistem pembangkit energi gelombang laut skala kecil hingga menengah [10],[11],[12], disamping eksplorasi teknologi berbasis material piezoelektrik [13]

Walaupun penelitian mengenai generator BLDC maupun energi gelombang telah berkembang cukup pesat, keduanya umumnya masih dikaji secara terpisah. Penelitian tentang energi gelombang lebih banyak berfokus pada estimasi potensi energi, optimasi perangkat Wave Energy Converter, atau pengembangan sistem Power Take-Off [14]. Di sisi lain, penelitian generator BLDC lebih banyak diarahkan pada aplikasi kendaraan listrik, turbin angin, dan pembangkit mikrohidro. Kajian yang secara khusus mengevaluasi kesesuaian karakteristik generator BLDC terhadap kondisi gelombang laut tropis masih relatif terbatas, terutama yang menggunakan data pengamatan lapangan sebagai dasar analisis teknis.

Perbedaan karakteristik gelombang antara wilayah subtropis dan perairan tropis menjadi tantangan tersendiri dalam pengembangan pembangkit energi gelombang di Indonesia. Sebagian besar teknologi yang tersedia dikembangkan berdasarkan kondisi gelombang dengan tinggi lebih dari 2 m sehingga belum tentu memberikan performa optimum ketika diterapkan pada wilayah pesisir Indonesia yang memiliki amplitudo gelombang lebih rendah [14],[15]. Kondisi tersebut menunjukkan perlunya pendekatan yang menyesuaikan pemilihan generator dengan karakteristik gelombang di lokasi pemasangan sehingga sistem yang dikembangkan memiliki efisiensi, keandalan, dan keekonomian yang lebih baik.

Kesenjangan penelitian tersebut menunjukkan bahwa masih diperlukan kajian yang mengintegrasikan karakteristik gelombang laut dengan karakteristik operasional generator BLDC sebagai dasar evaluasi kelayakan teknis sistem pembangkit energi gelombang. Hingga saat ini, belum banyak penelitian yang membahas kesesuaian generator BLDC berkecepatan rendah berdasarkan data gelombang jangka panjang yang diolah mengikuti standar internasional penilaian energi laut pada wilayah pesisir Indonesia [16]. Akibatnya, informasi mengenai spesifikasi generator yang sesuai dengan kondisi gelombang laut tropis masih sangat terbatas dan belum dapat dijadikan acuan dalam pengembangan sistem pembangkit energi gelombang skala kecil.

Kontribusi utama penelitian ini terletak pada penyusunan kerangka evaluasi kelayakan teknis

generator BLDC berkecepatan rendah melalui integrasi karakteristik gelombang laut aktual dengan karakteristik operasional generator. Pendekatan tersebut diharapkan dapat memberikan dasar ilmiah dalam pemilihan generator yang lebih sesuai untuk sistem pembangkit energi gelombang di wilayah pesisir tropis, sekaligus menjadi referensi bagi pengembangan teknologi energi laut yang lebih sederhana, efisien, dan ekonomis [17].

Penelitian ini bertujuan menganalisis kelayakan teknis generator Brushless Direct Current (BLDC) berkecepatan rendah sebagai sistem konversi energi pada pembangkit energi gelombang laut di Perairan Pantai Malalayang. Secara khusus, penelitian ini mengevaluasi kesesuaian karakteristik operasi generator terhadap kondisi gelombang laut, menganalisis potensi penerapannya pada sistem pembangkit skala kecil, serta menyusun rekomendasi teknis sebagai dasar pengembangan pembangkit energi gelombang laut yang sesuai dengan karakteristik perairan tropis Indonesia.

## 2. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1. Energi Gelombang Laut

Energi gelombang laut merupakan salah satu bentuk energi terbarukan yang berasal dari perpindahan energi angin ke permukaan laut. Energi tersebut tersimpan dalam bentuk energi potensial dan energi kinetik yang dapat dikonversi menjadi energi listrik menggunakan sistem Wave Energy Converter (WEC). Dibandingkan sumber energi terbarukan lainnya, energi gelombang memiliki densitas energi yang lebih tinggi serta karakteristik yang relatif stabil sehingga berpotensi menjadi sumber energi alternatif bagi wilayah pesisir [3], [4]. Besarnya daya gelombang laut pada kondisi perairan dalam (*deep water*) dapat dihitung menggunakan Persamaan (1).

$$P = \frac{\rho g^2}{64\pi} H_s^2 T_e \quad (1)$$

dengan:

$P$  = daya gelombang (W/m)

$\rho$  = massa jenis air laut ( $1025 \text{ kg/m}^3$ )

$g$  = percepatan gravitasi ( $9,81 \text{ m/s}^2$ )

$H_s$  = tinggi gelombang signifikan (m)

$T_e$  = periode energi gelombang (s)

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa daya gelombang berbanding lurus terhadap kuadrat tinggi gelombang sehingga perubahan

kecil pada tinggi gelombang akan memberikan perubahan energi yang cukup signifikan [3], [4].

### 2.2. Wave Energy Converter (WEC)

Wave Energy Converter merupakan sistem yang mengubah energi mekanik gelombang menjadi energi listrik melalui mekanisme penyerapan energi (Power Take-Off). Berdasarkan prinsip kerjanya, WEC dapat diklasifikasikan menjadi beberapa tipe, antara lain Oscillating Water Column, Point Absorber, Oscillating Wave Surge Converter, dan Overtopping Device [3], [18], [7].

Pada seluruh tipe tersebut, sistem Power Take-Off berfungsi mentransmisikan gerakan mekanik akibat gelombang menuju generator listrik. Oleh karena itu, pemilihan jenis generator sangat menentukan efisiensi konversi energi dan keandalan sistem pembangkit [4], [9].

### 2.3. Generator Brushless Direct Current (BLDC)

Generator Brushless Direct Current (BLDC) merupakan mesin sinkron magnet permanen yang menggunakan magnet permanen pada rotor dan lilitan tiga fasa pada stator. Berbeda dengan motor DC konvensional, generator BLDC tidak menggunakan sikat (brush) maupun komutator mekanik sehingga memiliki efisiensi lebih tinggi, rugi-rugi mekanik lebih rendah, serta membutuhkan perawatan yang minimal [10], [11], [12].

Hubungan antara kecepatan putar rotor dan tegangan induksi generator dinyatakan dengan Persamaan (2).

$$E = K_e \omega \quad (2)$$

dengan:

$E$  = tegangan induksi (Volt)

$K_e$  = konstanta tegangan generator

$\omega$  = kecepatan sudut rotor (rad/s)

Daya listrik yang dihasilkan generator dihitung menggunakan Persamaan (3).

$$P = VI \quad (3)$$

dengan:

$P$  = daya listrik (W)

$V$  = tegangan keluaran (V)

$I$  = arus keluaran (A)

Efisiensi generator dinyatakan pada Persamaan (4).

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (4)$$

Karakteristik generator BLDC yang mampu menghasilkan tegangan pada putaran rendah menjadikannya sesuai untuk aplikasi energi terbarukan yang memiliki kecepatan mekanik relatif rendah, termasuk sistem pembangkit energi gelombang laut skala kecil [10],[11],[12].

#### 2.4. Kelayakan Teknis Generator pada Sistem Energi Gelombang

Kelayakan teknis merupakan proses evaluasi kesesuaian suatu teknologi terhadap kondisi operasi yang direncanakan. Pada sistem pembangkit energi gelombang laut, evaluasi teknis dilakukan dengan mempertimbangkan kesesuaian antara karakteristik gelombang laut dan karakteristik operasi generator, seperti kecepatan putar, torsi, daya keluaran, serta efisiensi konversi energi [4], [9].

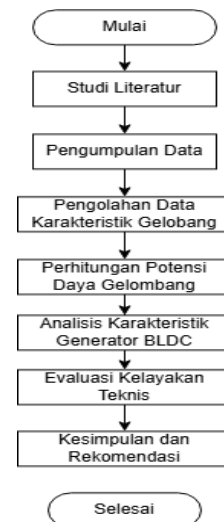
Generator yang digunakan harus mampu menghasilkan energi listrik secara optimal pada kondisi kecepatan putar rendah dengan tetap mempertahankan efisiensi yang tinggi. Salah satu solusi inovatif untuk mencapai kondisi tersebut adalah melalui modifikasi motor BLDC menjadi generator sinkron magnet permanen fluks radial putaran rendah yang terbukti andal dalam sistem konversi energi terbarukan [19]. Oleh karena itu, parameter utama yang digunakan dalam analisis kelayakan teknis pada penelitian ini meliputi karakteristik gelombang laut, potensi daya gelombang, kebutuhan putaran generator, estimasi daya keluaran, dan efisiensi sistem konversi energi [9], [18], [19].

### 3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode kuantitatif deskriptif dengan pendekatan analisis teknis. Tahapan penelitian meliputi pengumpulan data gelombang laut, pengolahan data karakteristik gelombang, perhitungan potensi daya gelombang, analisis karakteristik generator Brushless Direct Current (BLDC) berkecepatan rendah, dan evaluasi kelayakan teknis penerapannya sebagai sistem konversi energi pada pembangkit energi gelombang laut.

Analisis dilakukan secara bertahap mulai dari identifikasi karakteristik gelombang laut,

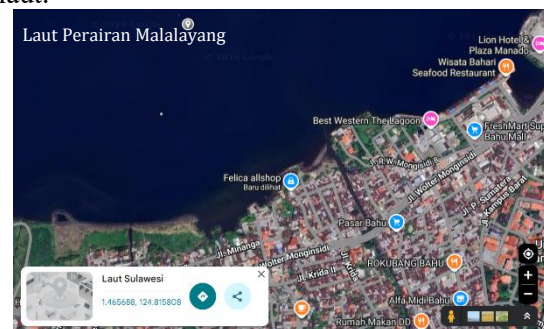
estimasi energi yang tersedia, hingga evaluasi kesesuaian karakteristik operasi generator terhadap kondisi gelombang di lokasi penelitian. Diagram alir penelitian ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

#### 3.1. Lokasi Penelitian

Penelitian dilakukan pada Perairan Pantai Malalayang, Kota Manado, Sulawesi Utara, yang merupakan salah satu kawasan pesisir dengan potensi pemanfaatan energi gelombang laut.



Gambar 2. Lokasi Penelitian

#### 3.2. Spesifikasi Generator BLDC

Spesifikasi generator Brushless Direct Current (BLDC) Permanent Magnet sebagai acuan dalam analisis kelayakan teknis. Generator yang dianalisis memiliki tegangan nominal 12 V/24 V, daya nominal 300 W, kecepatan putar nominal 300 rpm, dan konfigurasi 16 kutub (16 pole) dengan efisiensi operasi berkisar antara 88–92%. Spesifikasi tersebut dipilih karena merepresentasikan generator BLDC berkecepatan rendah (low-

speed generator) yang umum digunakan pada aplikasi energi terbarukan skala kecil, seperti turbin angin, mikrohidro, dan sistem konversi energi gelombang laut. Kecepatan nominal 300 rpm dinilai sesuai untuk sistem power take-off (PTO) yang memanfaatkan gerakan osilasi gelombang melalui mekanisme transmisi mekanik, sedangkan rentang efisiensi yang tinggi memungkinkan proses konversi energi berlangsung lebih optimal. Analisis hubungan antara kecepatan putar rotor dan tegangan induksi dilakukan menggunakan konstanta tegangan ( $K_e$ ) yang nilainya disesuaikan dengan spesifikasi generator atau data pabrikan yang digunakan sebagai acuan dalam penelitian.

Tabel 1. Spesifikasi Teknis Generator BLDC

| Parameter                    | Nilai                                        |
|------------------------------|----------------------------------------------|
| Jenis                        | BLDC Permanent Magnet                        |
| Tegangan nominal             | 12 V / 24 V                                  |
| Daya nominal                 | 300 W                                        |
| Putaran nominal              | 300 rpm                                      |
| Jumlah kutub                 | 16 pole                                      |
| Efisiensi                    | 88–92 %                                      |
| Konstanta tegangan ( $K_e$ ) | 0,38 V/rad/s (12 V) atau 0,76 V/rad/s (24 V) |

#### 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

##### 4.1. Karakteristik Gelombang Laut Perairan Pantai Malalayang

Analisis dilakukan menggunakan data gelombang laut di Perairan Pantai Malalayang selama periode Januari 2024 hingga Juni 2026. Data menunjukkan bahwa karakteristik gelombang di lokasi penelitian termasuk dalam kategori gelombang berenergi rendah (low-energy wave) dengan variasi musiman yang dipengaruhi oleh kondisi angin dan dinamika oseanografi wilayah Sulawesi Utara.

Hasil pengolahan data menunjukkan bahwa tinggi gelombang rata-rata selama periode pengamatan mencapai 0,263 m, sedangkan tinggi gelombang maksimum mencapai 0,875 m. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa sebagian besar gelombang di Pantai Malalayang berada pada rentang kurang dari 0,5 m, sementara peningkatan tinggi gelombang

terjadi pada periode tertentu akibat pengaruh musim dan kondisi cuaca.

Tabel 2. Karakteristik Tinggi Gelombang Laut Perairan Malalayang Periode Tahun 2024

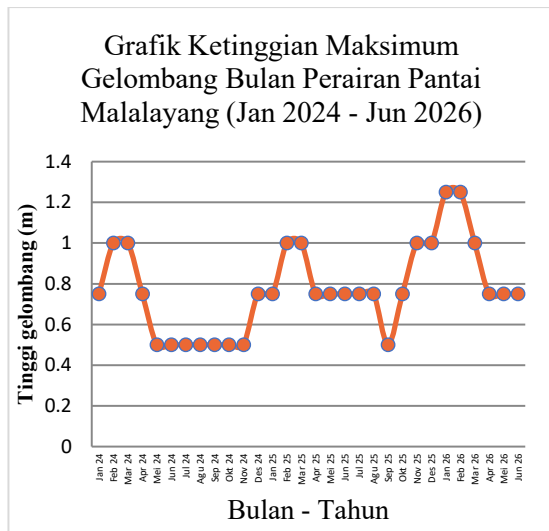
| Bulan     | Ketinggian Rata-rata (m) | Ketinggian Maksimum |
|-----------|--------------------------|---------------------|
| Januari   | 0 - 0.5                  | 0.5 - 0.75          |
| Februari  | 0 - 0.5                  | 0.5 - 1             |
| Maret     | 0 - 0.5                  | 0.5 - 1             |
| April     | 0 - 0.5                  | 0.5 - 0.75          |
| Mei       | 0 - 0.5                  | 0 - 0.5             |
| Juni      | 0 - 0.5                  | 0 - 0.5             |
| Juli      | 0 - 0.5                  | 0 - 0.5             |
| Agustus   | 0 - 0.5                  | 0 - 0.5             |
| September | 0 - 0.5                  | 0 - 0.5             |
| Oktober   | 0 - 0.5                  | 0 - 0.5             |
| November  | 0 - 0.5                  | 0 - 0.5             |
| Desember  | 0 - 0.5                  | 0.5 - 0.75          |

Tabel 3. Karakteristik Tinggi Gelombang Laut Perairan Malalayang Periode Tahun 2025

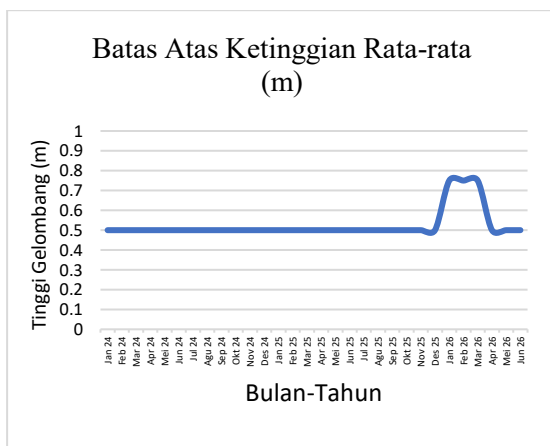
| Bulan     | Ketinggian Rata-rata (m) | Ketinggian Maksimum |
|-----------|--------------------------|---------------------|
| Januari   | 0 - 0.5                  | 0 - 0.75            |
| Februari  | 0 - 0.5                  | 0.5 - 1             |
| Maret     | 0 - 0.5                  | 0.5 - 1             |
| April     | 0 - 0.5                  | 0.5 - 0.75          |
| Mei       | 0 - 0.5                  | 0 - 0.75            |
| Juni      | 0 - 0.5                  | 0.5 - 0.75          |
| Juli      | 0 - 0.5                  | 0.5 - 0.75          |
| Agustus   | 0 - 0.5                  | 0 - 0.75            |
| September | 0 - 0.5                  | 0 - 0.5             |
| Oktober   | 0 - 0.5                  | 0.5 - 0.75          |
| November  | 0 - 0.5                  | 0.5 - 1             |
| Desember  | 0 - 0.5                  | 0.5 - 1             |

Tabel 4. Karakteristik Tinggi Gelombang Laut Perairan Malalayang Periode Tahun 2026

| Bulan    | Ketinggian Rata-rata (m) | Ketinggian Maksimum |
|----------|--------------------------|---------------------|
| Januari  | 0 - 0.75                 | 0.5 - 1.25          |
| Februari | 0 - 0.75                 | 0.5 - 1.25          |
| Maret    | 0 - 0.75                 | 0.5 - 1             |
| April    | 0 - 0.5                  | 0.5 - 0.75          |
| Mei      | 0 - 0.5                  | 0.5 - 0.75          |
| Juni     | 0 - 0.5                  | 0.5 - 0.75          |



Gambar 3. Grafik Tinggi Gelombang Laut Bulanan perairan pantai Malalayang Jan 24-Jun 2026



Gambar 3. Grafik Batas Atas Ketinggian Rata-rata

Secara umum, pola perubahan tinggi gelombang relatif konsisten dari tahun ke tahun dengan kecenderungan peningkatan pada awal tahun dan penurunan pada pertengahan tahun. Karakteristik tersebut menunjukkan bahwa energi gelombang tersedia secara kontinu meskipun tidak sebesar wilayah samudra terbuka. Oleh karena itu, sistem pembangkit yang dikembangkan harus mampu bekerja secara efektif pada kondisi gelombang rendah.

#### 4.2. Analisis Potensi Energi Gelombang

Potensi energi gelombang dihitung menggunakan persamaan daya gelombang laut

berdasarkan tinggi gelombang signifikan. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa power density rata-rata di Perairan Pantai Malalayang sebesar 0,241 kW/m, sedangkan pada kondisi gelombang maksimum meningkat hingga sekitar 2,13 kW/m.

Nilai tersebut menunjukkan bahwa meskipun lokasi penelitian tidak termasuk wilayah dengan energi gelombang tinggi, energi yang tersedia masih cukup untuk dimanfaatkan pada sistem pembangkit listrik skala kecil (small-scale wave energy converter). Besarnya power density juga memperlihatkan bahwa daya yang dihasilkan sangat dipengaruhi oleh tinggi gelombang, karena daya gelombang berbanding lurus terhadap kuadrat tinggi gelombang. Dengan demikian, peningkatan tinggi gelombang pada musim tertentu memberikan kontribusi yang signifikan terhadap peningkatan potensi energi yang dapat dikonversi menjadi energi listrik.

Dibandingkan dengan wilayah samudra terbuka yang memiliki power density di atas 20 kW/m, potensi energi di Pantai Malalayang memang relatif lebih rendah. Namun demikian, karakteristik tersebut justru sesuai untuk pengembangan sistem pembangkit berkapasitas kecil yang dirancang menggunakan generator berkecepatan rendah.

#### 4.3. Analisis Kesesuaian Generator BLDC

Generator yang digunakan sebagai objek analisis memiliki spesifikasi berupa generator Brushless Direct Current (BLDC) Permanent Magnet dengan tegangan nominal 12/24 V, daya nominal 300 W, putaran nominal 300 rpm, konfigurasi 16 kutub, serta efisiensi operasi antara 88–92%.

Karakteristik utama generator BLDC adalah kemampuan menghasilkan tegangan pada putaran rendah. Dengan putaran nominal 300 rpm, kecepatan sudut rotor dapat dihitung sebesar:

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} = 31,42 \text{ rad/s}$$

Apabila digunakan generator 24 V, maka konstanta tegangan teoritis diperoleh sekitar:

$$K_e = \frac{24}{31,42} = 0,76 \text{ V/rad/s}$$

Sedangkan untuk generator 12 V diperoleh:

$$K_e = 0,38 \text{ V/rad/s}$$

Nilai tersebut menunjukkan bahwa generator BLDC mampu menghasilkan tegangan keluaran pada kecepatan putar yang relatif rendah. Kondisi ini sesuai dengan karakteristik gelombang Pantai Malalayang yang tidak menghasilkan gerakan mekanik berkecepatan tinggi. Dengan bantuan mekanisme Power Take-Off (PTO), osilasi gelombang masih dapat dikonversi menjadi putaran rotor yang memenuhi kebutuhan operasi generator.

Selain itu, efisiensi generator yang mencapai 88–92% menunjukkan bahwa sebagian besar energi mekanik yang diterima dapat dikonversi menjadi energi listrik. Hal tersebut menjadi salah satu keunggulan generator BLDC dibandingkan generator konvensional yang menggunakan sikat (brush), karena rugi-rugi mekanik dan kebutuhan perawatan menjadi lebih rendah.

#### 4.4. Evaluasi Kelayakan Teknis

Evaluasi kelayakan teknis dilakukan dengan membandingkan karakteristik gelombang laut terhadap spesifikasi operasi generator BLDC. Hasil evaluasi disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Evaluasi Kelayakan Teknis Generator BLDC

| Parameter                  | Hasil Analisis | Evaluasi                              |
|----------------------------|----------------|---------------------------------------|
| Tinggi gelombang rata-rata | 0,263 m        | Sesuai untuk sistem gelombang rendah  |
| Tinggi gelombang maksimum  | 0,875 m        | Memberikan peningkatan energi musiman |
| Power density rata-rata    | 0,241 kW/m     | Cukup untuk pembangkit skala kecil    |
| Power density maksimum     | 2,13 kW/m      | Mendukung peningkatan daya keluaran   |
| Putaran nominal generator  | 300 rpm        | Sesuai dengan PTO berkecepatan rendah |
| Tegangan nominal           | 12/24 V        | Memenuhi kebutuhan sistem DC          |
| Efisiensi generator        | 88–92%         | Tinggi                                |

| Tingkat kelayakan | Layak | Direkomendasikan |
|-------------------|-------|------------------|
|-------------------|-------|------------------|

Berdasarkan hasil evaluasi tersebut, generator BLDC berkecepatan rendah dinilai layak digunakan sebagai sistem konversi energi pada pembangkit energi gelombang laut di Perairan Pantai Malalayang. Tinggi gelombang rata-rata memang relatif rendah, namun kontinuitas gelombang yang tersedia memungkinkan pembangkitan energi secara berkelanjutan apabila dipadukan dengan sistem Power Take-Off yang dirancang sesuai karakteristik lokasi. Selain itu, penggunaan generator BLDC memberikan beberapa keuntungan, antara lain ukuran yang lebih kompak, efisiensi tinggi, kebutuhan perawatan yang rendah, serta kemampuan menghasilkan tegangan pada putaran rendah. Karakteristik tersebut menjadikan generator BLDC lebih sesuai dibandingkan generator yang dirancang untuk kondisi gelombang berenergi tinggi.

#### 4.5. Pembahasan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa karakteristik gelombang Pantai Malalayang tidak dapat dikategorikan sebagai sumber energi gelombang berskala besar, namun memiliki potensi yang cukup untuk pengembangan pembangkit listrik skala kecil bagi wilayah pesisir. Temuan ini sejalan dengan berbagai penelitian yang menyatakan bahwa wilayah tropis umumnya memiliki tinggi gelombang lebih rendah dibandingkan wilayah subtropis sehingga memerlukan sistem konversi energi yang mampu beroperasi pada putaran rendah.

Dalam konteks tersebut, generator BLDC berkecepatan rendah menjadi alternatif yang relevan karena mampu menghasilkan tegangan keluaran pada putaran sekitar 300 rpm dengan efisiensi mencapai 88–92%. Kombinasi antara karakteristik gelombang Pantai Malalayang dan spesifikasi generator BLDC menunjukkan bahwa sistem ini lebih tepat diterapkan pada pembangkit listrik skala kecil untuk mendukung kebutuhan energi fasilitas pesisir, seperti sistem penerangan, stasiun pemantauan, perangkat IoT, atau pengisian baterai. Oleh karena itu, hasil penelitian ini memberikan dasar teknis bahwa pemanfaatan generator BLDC pada sistem pembangkit energi gelombang laut di wilayah pesisir tropis

merupakan alternatif yang layak untuk dikembangkan lebih lanjut melalui pengujian prototipe dan implementasi lapangan.

## 5. KESIMPULAN

Penelitian ini menganalisis kelayakan teknis generator Brushless Direct Current (BLDC) berkecepatan rendah sebagai sistem konversi energi pada pembangkit energi gelombang laut di Perairan Pantai Malalayang menggunakan data gelombang periode Januari 2024 hingga Juni 2026. Hasil analisis menunjukkan bahwa lokasi penelitian memiliki tinggi gelombang rata-rata sebesar 0,263 m dengan tinggi maksimum mencapai 0,875 m, serta power density rata-rata sebesar 0,241 kW/m yang meningkat hingga sekitar 2,13 kW/m pada kondisi gelombang maksimum. Karakteristik tersebut menunjukkan bahwa Perairan Pantai Malalayang memiliki potensi untuk pengembangan pembangkit energi gelombang laut skala kecil. Generator BLDC dengan spesifikasi tegangan nominal 12/24 V, daya 300 W, putaran nominal 300 rpm, konfigurasi 16 kutub, dan efisiensi 88–92% dinilai sesuai untuk diaplikasikan pada kondisi gelombang berenergi rendah karena mampu beroperasi secara efektif pada putaran rendah dengan efisiensi konversi yang tinggi.

Penelitian ini memberikan kontribusi berupa evaluasi awal kesesuaian karakteristik gelombang laut dengan spesifikasi generator BLDC sebagai dasar pengembangan sistem pembangkit energi gelombang laut di wilayah pesisir tropis. Meskipun demikian, penelitian ini masih terbatas pada analisis teknis berbasis data gelombang dan belum mencakup pengujian prototipe maupun implementasi lapangan. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan pengujian eksperimental menggunakan sistem Wave Energy Converter yang terintegrasi dengan generator BLDC serta mengevaluasi performa pembangkitan listrik pada kondisi gelombang aktual guna memvalidasi hasil analisis yang diperoleh..

## 6. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak terkait yang telah memberi dukungan terhadap penelitian ini.

## 7. DAFTAR PUSTAKA

- [1] IPCC, Climate Change 2023: Synthesis Report. Geneva, Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023.
- [2] A. Alamsah, A. Wahjudi, P. J. Moon, N. Hamidi, and D. Widhiyanuriyawan, "Potensi Energi Arus dan Tinggi Gelombang Laut Indonesia Berdasarkan Data Penginderaan Jauh," *Techno-Socio Ekonomika*, vol. 18, no. 1, pp. 49–59, 2025, doi: 10.32897/techno.2025.18.1.4087.
- [3] J. Falnes and A. Kurniawan, *Ocean Waves and Oscillating Systems: Linear Interactions Including Wave-Energy Extraction*, 2nd ed. Cambridge, U.K.: Cambridge University Press, 2020.
- [4] D. Greaves and G. Iglesias, *Wave and Tidal Energy*. Chichester, U.K.: John Wiley & Sons, 2018.
- [5] Y. P. Wimalaratna, A. Hassan, H. N. Afrouzi, K. Mehranzamir, J. Ahmed, B. M. Siddique, and S. C. Liew, "Comprehensive review on the feasibility of developing wave energy as a renewable energy resource in Australia," *Clean Energy Systems*, vol. 3, Art. no. 100021, 2022, doi: 10.1016/j.cles.2022.100021.
- [6] S. Jin and D. Greaves, "Wave energy in the UK: Status review and future perspectives," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 143, Art. no. 110932, 2021, doi: 10.1016/j.rser.2021.110932.
- [7] Y. Zhang, Y. Zhao, W. Sun, and J. Li, "Ocean Wave Energy Converters: Technical Principle, Device Realization, and Performance Evaluation," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 141, Art. no. 110764, 2021.
- [8] L. Wang, M. Lin, E. Tedeschi, J. Engström, and J. Isberg, "Improving Electric Power Generation of a Standalone Wave Energy Converter via Optimal Electric Load Control," *Energy*, vol. 211, Art. no. 118945, 2020, doi: 10.1016/j.energy.2020.118945.
- [9] A. F. de O. Falcão and J. C. C. Henriques, "Oscillating-water-column wave energy converters and air turbines: A review," *Renewable Energy*, vol. 85, pp. 1391–1424, 2016.
- [10] P. Khatri and X. Wang, "Comprehensive review of a linear electrical generator for ocean wave energy conversion," *IET Renewable Power Generation*, vol. 14, no. 6, pp. 949–958, 2020, doi: 10.1049/iet-rpg.2019.0624.
- [11] A. Rahman, O. Farrok, M. R. Islam, and W. Xu, "Recent Progress in Electrical Generators for Oceanic Wave Energy Conversion," *IEEE*

- Access, vol. 8, pp. 138595–138615, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3012662.
- [12] R. Krishnan, *Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2009.
- [13] M. R. Kiran, O. Farrok, M. Abdullah-Al-Mamun, M. R. Islam, and W. Xu, “Progress in Piezoelectric Material Based Oceanic Wave Energy Conversion Technology,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 146428–146449, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3015821.
- [14] N. Guillou, G. Lavidas, and G. Chapalain, “Wave Energy Resource Assessment for Exploitation—A Review,” *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 8, no. 9, Art. no. 705, 2020, doi: 10.3390/jmse8090705.
- [15] B. Zhou, Z. Zheng, Y. Yao, S. He, P. Jin, H. Du, Y. Yang, and H. Shi, “Wave Energy Converters: A Comprehensive Review of Research Progress, Key Challenges, and Future Trends,” *Applied Energy*, vol. 413, Art. no. 127722, 2026.
- [16] International Electrotechnical Commission, *IEC TS 62600-101: Marine Energy—Wave, Tidal and Other Water Current Converters—Part 101: Wave Energy Resource Assessment and Characterization*, 2nd ed. Geneva, Switzerland: IEC, 2024.
- [17] M. I. Ullah, T. B. Hashfi, J. S. Döhler, V. M. de Albuquerque, A. Aitkulova, J. Forslund, C. Boström, A. Wahyudie, and I. Temiz, “Isolated Grid-Forming Control of Wave Energy Converter for Island Electrification,” *IEEE Access*, vol. 13, pp. 50860–50875, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3552820.
- [18] B. Czech and P. Bauer, “Wave Energy Converter Concepts: Design Challenges and Classification,” *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 6, no. 2, pp. 4–16, 2012.
- [19] D. G. Ramdhany, N. Hiron, and N. Busaeri, “Modifikasi Motor Brushless DC Menjadi Generator Sinkron Magnet Permanen Fluks Radial Putaran Rendah,” *Journal of Energy and Electrical Engineering (JEEE)*, vol. 3, no. 1, 2021, doi: 10.37058/jeee.v3i1.3447.