

BAB IV

PEMBAHASAN

4.1 Data BMKG Lampung

Perhitungan potensi energi gelombang laut pada penelitian ini menggunakan data karakteristik gelombang dari wilayah perairan Pesisir Lampung yang diperoleh dari Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG). Berdasarkan data prakiraan maritim BMKG, tinggi gelombang di perairan Pesisir Lampung berkisar antara 1,43 m hingga 1,50 m gelombang laut pada lokasi penelitian memiliki potensi energi yang cukup besar untuk dimanfaatkan sebagai sumber energi listrik terbarukan. Data Hasil Pengukuran



BADAN METEOROLOGI KLIMATOLOGI DAN GEOFISIKA

Stasiun Meteorologi Maritim Panjang - Bandar Lampung

Alamat : Jl. Yos Sudarso no. 64, Way Lunik, Panjang, Bandar Lampung - Lampung 35243

Telp : 0721-343154 Email : stamarpij@gmail.com, stamarlampung@bmkg.go.id

PRAKIRAAN CUACA PELABUHAN

Pelabuhan Krui

No. : B/ME.01.02/CP/04/KLMP/VI/2026

Berlaku 30 Mei 2026 07:00 WIB - 31 Mei 2026 06:00 WIB

Tanggal	30 Mei 2026																							31 Mei 2026					
Jam	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	00	01	02	03	04	05	06					
Kondisi Cuaca																													
Visibilitas (km)	4	4	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	4	4	4					
Suhu Udara (C)	25	27	28	29	30	29	29	29	29	29	29	28	28	27	26	26	26	25	25	25	24	24	24	24					
Kelembapan Udara (%)	94	85	78	72	72	76	73	72	72	74	79	82	84	85	90	91	90	89	91	94	94	93	90	90					
Arah Angin																													
	N	N	S	S	S	NW	NW	NW	S	S	S	W	W	W	E	E	E	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE					
Kecepatan Angin (knot)	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	5	5	5	5	4	4	4	5					
Wind Gust (knot)	5	5	8	8	10	13	11	10	10	9	7	5	4	5	6	6	6	7	7	7	8	7	7	7					
Tinggi Gelombang Signifikan (m)	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.70	1.70	1.80	1.80	1.90	2.00	1.90	1.80	1.80	1.80	1.80	1.70	1.70	1.70	1.80	1.80	1.80					
Arah Arus Permukaan																													
	SW	SW	W	NW	N	N	N	N	N	N	N	NW	W	W	SW	SW	W	SW	W	W	SW	SW	W	W					
Kecepatan Arus Permukaan (knot)	0.63	0.62	0.61	0.62	0.68	0.70	0.72	0.73	0.74	0.73	0.70	0.66	0.63	0.62	0.63	0.62	0.61	0.62	0.62	0.62	0.61	0.62	0.61	0.61					
Tinggi Muka Laut (m)	0.32	0.37	0.44	0.42	0.30	0.19	-0.01	-0.20	-0.39	-0.47	-0.33	-0.28	-0.09	0.13	0.13	0.12	0.12	0.12	-0.06	-0.05	-0.06	-0.05	0.06	0.13					

Gambar 4.1 Data BMKG Pelabuhan Lampung

4.2 Perhitungan Daya Gelombang Laut

Pengambilan data gelombang laut dilakukan selama 24 jam dengan interval pengamatan setiap 3 jam. Parameter yang diamati meliputi tinggi gelombang signifikan (H_s), periode gelombang (T), dan daya gelombang laut (P). Hasil pengukuran ditunjukkan pada Tabel 4.1.

Perhitungan daya gelombang laut dilakukan menggunakan persamaan:

$$E = 0,49 H_s^2 T$$

Sebagai contoh, untuk data pengukuran pada pukul 07.00 WIB diperoleh:

$$H_s = 1,51 \text{ m}$$

$$T = 13,2 \text{ s}$$

Maka:

$$E = 0,49 \times (1,50)^2 \times 13,2$$

$$E = 14,55 \text{ kW/m}$$

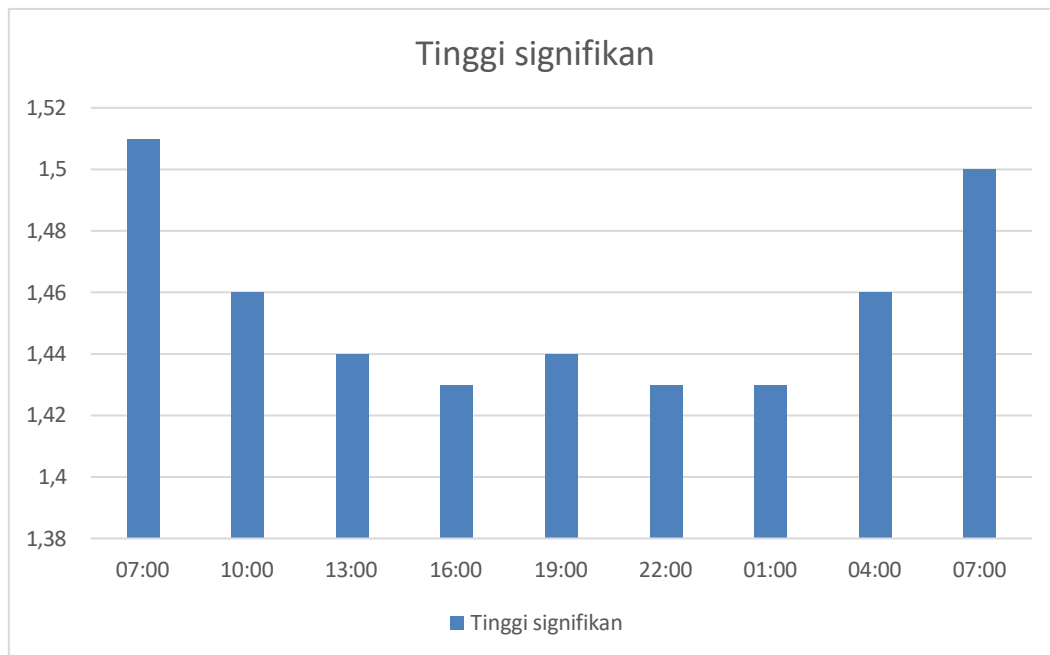
atau sekitar 14.788 W/m.

Berdasarkan data pengukuran, tinggi gelombang signifikan yang diperoleh berkisar antara 1,43 m hingga 1,50 m. Periode gelombang berkisar antara 13,2 s hingga 13,7 s. Nilai daya gelombang yang dihasilkan berada pada rentang 13.232 W/m hingga 15.145 W/m.

Tabel 4. 1 Data Hasil Pengukuran Berdasarkan Waktu

No	Waktu (WIB)	Tinggi signifikan H_s (m)	Periode gelombang T (s)	Daya gelombang E (wm)
1	07:00	1,51	13,2	14788
2	10:00	1,46	13,2	13804
3	13:00	1,44	13,2	13438
4	16:00	1,43	13,2	13232
5	19:00	1,44	13,2	13428
6	22:00	1,43	13,2	13262
7	01:00	1,43	13,3	13333
8	04:00	1,46	13,5	14097
9	07:00	1,50	13,7	15145

4.2.1 Grafik Hubungan Waktu terhadap Tinggi Gelombang

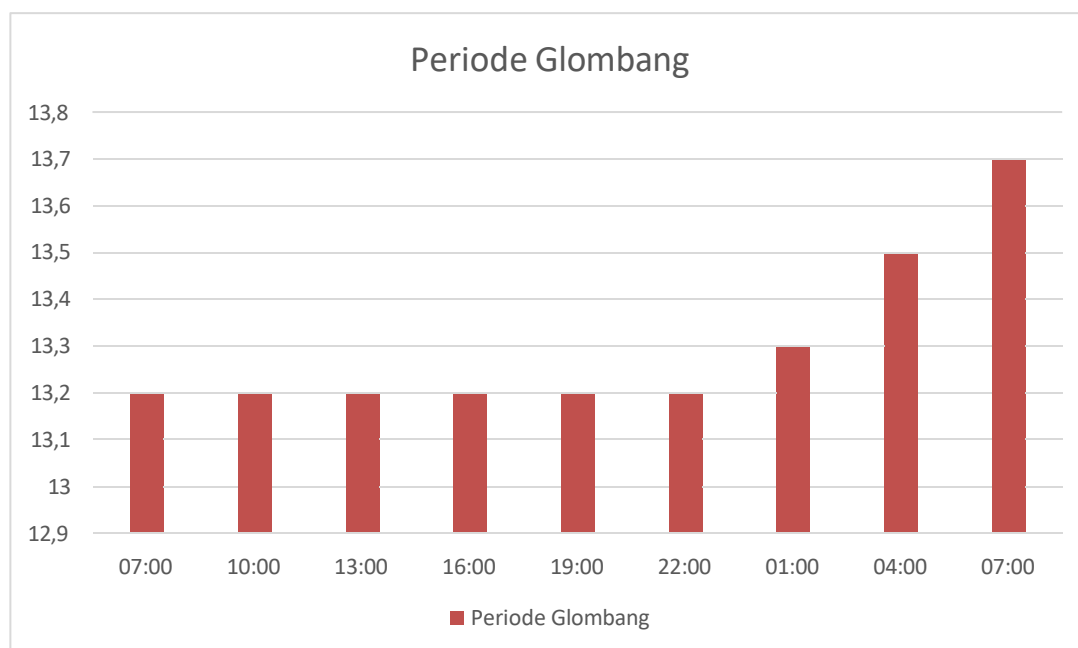


Gambar 4.2 Grafik waktu terhadap tinggi gelombang

Berdasarkan data pada Tabel 4.4, tinggi gelombang signifikan (H_s) selama pengamatan berkisar antara 1,43 m hingga 1,50 m. Nilai tinggi gelombang tertinggi terjadi pada pukul 07.00 WIB sebesar 1,50 m dan kembali mencapai nilai yang sama pada pukul 07.00 WIB hari berikutnya. Sementara itu, tinggi gelombang terendah terjadi pada pukul 16.00 WIB, 22.00 WIB, dan 01.00 WIB yaitu sebesar 1,43 m.

Berdasarkan grafik hubungan waktu terhadap tinggi gelombang signifikan, terlihat bahwa tinggi gelombang mengalami fluktuasi yang relatif kecil selama periode pengamatan. Pada pagi hari tinggi gelombang cenderung lebih tinggi, kemudian mengalami penurunan pada siang hingga sore hari. Setelah itu tinggi gelombang kembali meningkat menjelang pagi hari berikutnya. Kondisi ini menunjukkan bahwa karakteristik gelombang di lokasi penelitian cukup stabil dan memiliki potensi yang baik untuk dimanfaatkan sebagai sumber energi listrik.

4.2.2 Grafik Hubungan Waktu terhadap Periode Gelombang

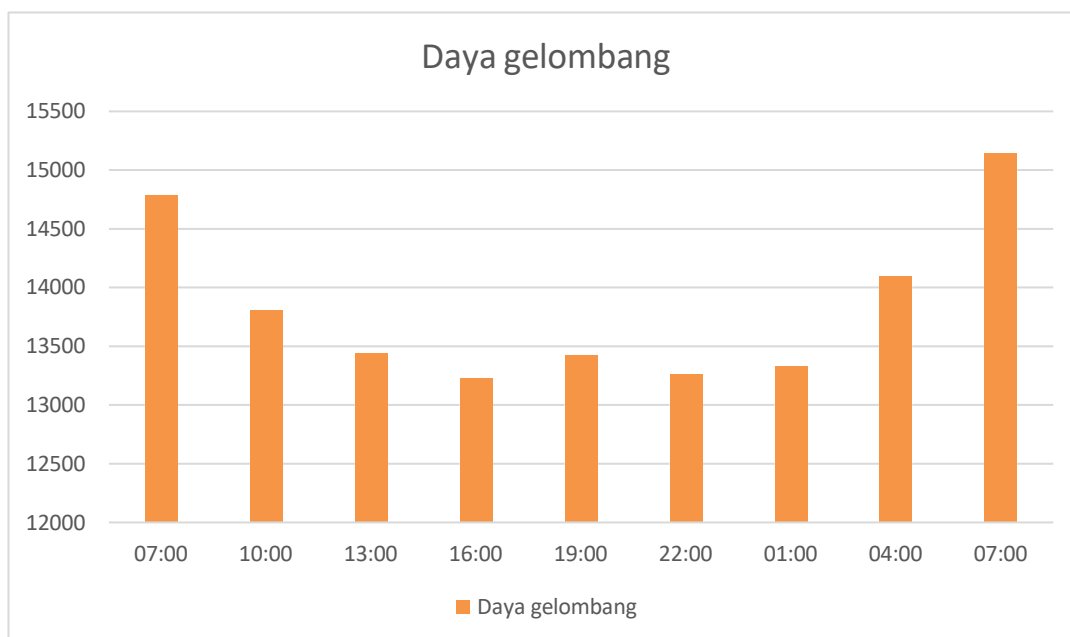


Gambar 4.3 Grafik waktu terhadap priode gelombang

Berdasarkan hasil pengukuran, periode gelombang (T) berkisar antara 13,2 detik hingga 13,7 detik. Nilai periode gelombang terendah sebesar 13,2 detik terjadi pada sebagian besar waktu pengamatan, yaitu pukul 07.00 WIB, 10.00 WIB, 13.00 WIB, 16.00 WIB, 19.00 WIB, dan 22.00 WIB. Sedangkan periode gelombang tertinggi sebesar 13,7 detik terjadi pada pukul 07.00 WIB hari berikutnya.

Grafik hubungan waktu terhadap periode gelombang menunjukkan bahwa perubahan periode gelombang tidak terlalu signifikan. Nilai periode yang relatif stabil menunjukkan bahwa gelombang laut pada lokasi penelitian memiliki pola yang cukup konsisten. Kondisi ini menguntungkan dalam pemanfaatan energi gelombang laut karena energi yang tersedia cenderung stabil dan dapat diprediksi.

4.2.3 Grafik Hubungan Waktu terhadap Daya Gelombang



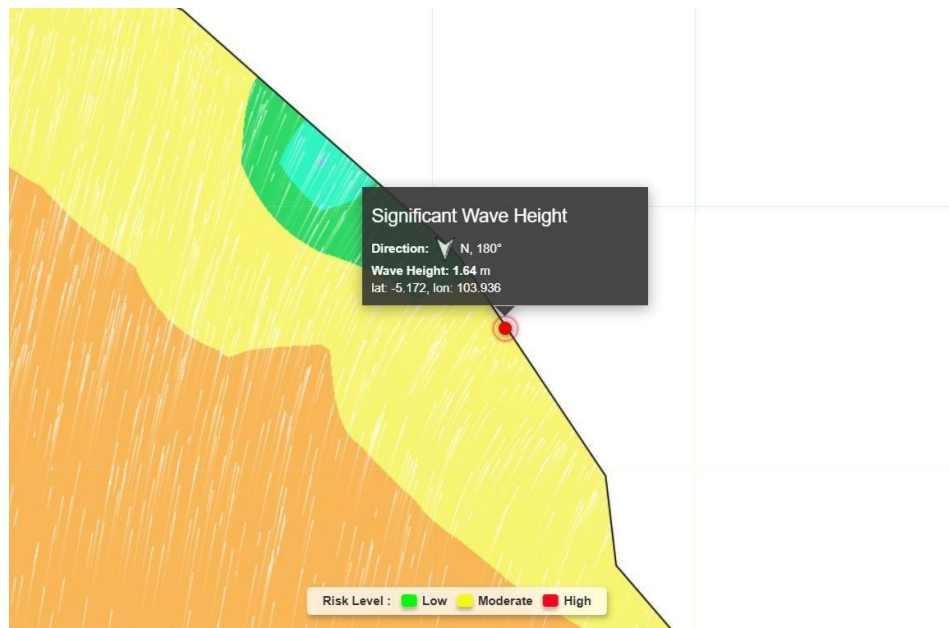
Gambar 4.4 Grafik waktu terhadap daya gelombang

Berdasarkan hasil perhitungan daya gelombang laut, diperoleh nilai daya yang berkisar antara 13.232 W/m hingga 15.145 W/m. Daya gelombang tertinggi terjadi pada pukul 07.00 WIB hari berikutnya sebesar 15.145 W/m, sedangkan daya gelombang terendah terjadi pada pukul 16.00 WIB sebesar 13.232 W/m.

Pada pukul 07.00 WIB daya gelombang sebesar 14.788 W/m, kemudian mengalami penurunan menjadi 13.804 W/m pada pukul 10.00 WIB dan terus menurun hingga mencapai nilai minimum pada pukul 16.00 WIB. Setelah itu daya gelombang kembali mengalami peningkatan pada pukul 19.00 WIB menjadi 13.428 W/m dan terus meningkat hingga mencapai nilai maksimum pada pukul 07.00 WIB hari berikutnya.

Berdasarkan grafik hubungan waktu terhadap daya gelombang, dapat dilihat bahwa perubahan daya gelombang mengikuti perubahan tinggi gelombang dan periode gelombang. Ketika tinggi gelombang meningkat, daya gelombang yang dihasilkan juga meningkat. Sebaliknya, ketika tinggi gelombang menurun maka daya gelombang ikut menurun.

4.3 Potensi PLTGL Di Pesisir Lampung



Gambar 4.5 Lokasi pemasangan PLTGL

Berdasarkan hasil pengukuran dan analisis data gelombang laut yang telah dilakukan, wilayah pesisir Krui memiliki karakteristik yang mendukung pengembangan Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut (PLTGL). Kelayakan lokasi ini ditinjau dari aspek potensi energi, stabilitas sumber daya, aspek teknis, serta aspek ekonomi yang berkaitan dengan pemanfaatan energi gelombang laut sebagai sumber energi terbarukan.

4.3.1 Potensi Energi Gelombang

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa daya gelombang rata-rata di pesisir Krui mencapai 13.892 W/m. Nilai tersebut lebih besar dibandingkan batas minimum sebesar 10.000 W/m yang umumnya digunakan sebagai acuan kelayakan pengembangan PLTGL skala komersial. Dengan demikian, potensi energi gelombang di lokasi penelitian dapat dikategorikan baik dan mampu menyediakan sumber energi yang cukup untuk mendukung pengoperasian pembangkit listrik tenaga gelombang laut.

4.3.2 Stabilitas Sumber Daya

Selain memiliki potensi energi yang tinggi, gelombang laut di pesisir Krui juga menunjukkan tingkat kestabilan yang baik. Hal ini ditunjukkan oleh nilai koefisien variasi (CV) sebesar 5,3%, yang menandakan bahwa fluktuasi daya gelombang relatif kecil selama periode pengamatan. Kondisi tersebut memberikan keuntungan dalam pengoperasian pembangkit karena energi yang dihasilkan cenderung lebih stabil dan dapat diprediksi dibandingkan sumber energi terbarukan lainnya seperti tenaga surya dan tenaga angin.

4.3.3 Aspek Teknis

Dari hasil pengamatan diperoleh tinggi gelombang signifikan berkisar antara 1,43–1,51 meter dengan periode gelombang 13,2–13,7 detik. Karakteristik tersebut sesuai untuk pengoperasian sistem konversi energi gelombang tipe wave roller yang memanfaatkan gerakan osilasi gelombang laut. Tingginya periode gelombang menunjukkan bahwa energi yang terkandung dalam gelombang cukup besar sehingga dapat dimanfaatkan secara efektif untuk menghasilkan energi listrik.

4.3.4 Aspek Produksi Energi

Berdasarkan hasil analisis, sistem PLTGL dengan kapasitas terpasang 5 MW dan faktor kapasitas sebesar 43% diperkirakan mampu menghasilkan energi listrik sebesar 18.798 MWh per tahun. Produksi energi tersebut menunjukkan bahwa pemanfaatan energi gelombang laut di pesisir Krui memiliki potensi yang cukup besar untuk mendukung kebutuhan energi listrik serta berkontribusi terhadap pengembangan energi baru terbarukan di Indonesia.

4.4 Parameter Mekanik Sistem PLTGL

Parameter mekanik merupakan parameter yang digunakan untuk mengetahui kinerja sistem mekanik dalam mengubah energi gelombang laut menjadi energi putar yang diteruskan ke generator. Pada penelitian ini, sistem transmisi menggunakan gearbox dengan rasio 1:15 untuk meningkatkan putaran yang dihasilkan oleh mekanisme penggerak akibat gelombang laut.

Sistem mekanik pada PLTGL ini menggunakan mekanisme crankshaft untuk mengubah gerak naik-turun pelampung akibat gelombang laut menjadi gerak putar. Gerakan vertikal yang dihasilkan oleh pelampung diteruskan melalui batang penghubung (connecting rod) menuju poros engkol (crankshaft). Selanjutnya, poros engkol menghasilkan putaran yang diteruskan ke gearbox untuk meningkatkan kecepatan putar sebelum menggerakkan generator. Penggunaan gearbox dengan rasio 1:15 bertujuan untuk meningkatkan putaran poros keluaran. Artinya, setiap satu putaran pada poros input akan menghasilkan 15 putaran pada poros output gearbox. Dengan demikian, putaran rendah yang berasal dari gerakan gelombang laut dapat ditingkatkan sehingga lebih sesuai dengan kebutuhan operasi generator.

Secara teoritis hubungan putaran input dan output gearbox dapat dinyatakan sebagai:

$$n_{out} = n_{in} \times 15 \text{ Keterangan:}$$

$$n_{out} = \text{putaran poros keluaran (rpm)} \quad n_{in} = \text{putaran poros masukan (rpm)}$$

Sebagai contoh, apabila poros crankshaft berputar sebesar 10 rpm akibat gerakan gelombang laut, maka putaran keluaran gearbox menjadi:

$$N_{out} = 10 \times 15$$

$$N_{out} = 150 \text{ rpm}$$

Nilai tersebut sudah cukup untuk mengoperasikan generator yang digunakan magnet skala kecil yang umumnya membutuhkan putaran tinggi untuk menghasilkan tegangan yang optimal. Namun demikian, peningkatan putaran akibat gearbox akan menyebabkan penurunan torsi pada poros keluaran. Oleh karena itu, sistem harus dirancang agar torsi yang dihasilkan pelampung dan crankshaft cukup besar untuk mengatasi rugi-rugi mekanik pada gearbox serta

beban generator. Efisiensi gearbox yang umumnya berada pada kisaran 70–90% juga perlu diperhitungkan karena akan mempengaruhi daya mekanik yang diteruskan ke generator.

Berdasarkan analisis tersebut, penggunaan mekanisme crankshaft yang dipadukan dengan gearbox rasio 1:15 mampu meningkatkan putaran secara signifikan sehingga cocok digunakan pada PLTGL skala prototipe. Sistem ini memungkinkan energi mekanik dari gelombang laut yang memiliki kecepatan rendah untuk dikonversi menjadi putaran generator yang lebih tinggi dan menghasilkan energi listrik yang lebih optimal.

4.5 Pengukuran Generator Tanpa Beban (*Open Circuit*)

Metode pengujian yang digunakan adalah *open-circuit test* (pengujian hubung terbuka), di mana generator dioperasikan tanpa beban sehingga parameter yang diamati adalah tegangan keluaran tanpa beban (*open-circuit voltage*).

4.5.1 Pengukuran Tegangan Tanpa Beban

Tabel 4. 2 Pengukuran Tegangan *Open Circuit*

Waktu (WIB)	Tegangan Voc (V)
07.00	27,3
09.00	28,7
11.00	29,5
13.00	29,9
15.00	28,1
17.00	27,5
19.00	27,2

4.5.2 Pengukuran Arus Tanpa Beban

Tabel 4. 3 Pengukuran Arus *Open Circuit*

Waktu (WIB)	Arus Aoc (A)
07.00	0
09.00	0
11.00	0
13.00	0
15.00	0
17.00	0
19.00	0

4.5.3 Pengukuran Daya Tanpa Beban

Tabel 4. 4 Pengukuran Daya Open Circuit

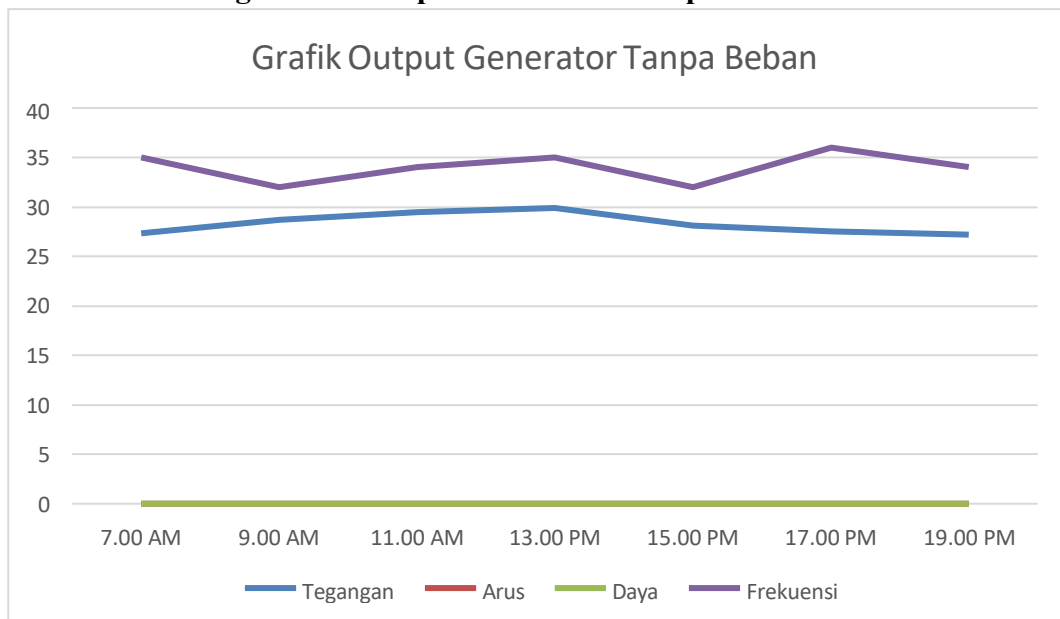
Waktu (WIB)	Daya (W)
07.00	0
09.00	0
11.00	0
13.00	0
15.00	0
17.00	0
19.00	0

4.5.4 Pengukuran Frekuensi Tanpa Beban

Tabel 4. 5 Pengukuran Frekuensi Open Circuit

Waktu (WIB)	F (Hz)
07.00	35
09.00	32
11.00	34
13.00	35
15.00	32
17.00	36
19.00	34

4.5.5 Grafik Pengukuran Output Generator Tanpa Beban



Gambar 4. 6 Grafik Pengukuran Output Generator Tanpa Beban

Berdasarkan grafik “Output Generator Tanpa Beban”, dapat disimpulkan bahwa tegangan keluaran (V_{oc}) relatif stabil pada kisaran 27–30 V dengan fluktuasi kecil yang mengikuti perubahan kondisi sumber gelombang, arus dan daya secara teoritis bernilai nol karena tidak adanya beban (open circuit), frekuensi keluaran cenderung stabil dengan sedikit variasi yang menunjukkan putaran mekanik generator masih konsisten, serta terdapat penyimpangan data pada pukul 19.00 yang kemungkinan disebabkan gangguan pengukuran atau kesalahan pencatatan, sehingga secara keseluruhan sistem mampu menghasilkan tegangan yang cukup stabil namun belum terjadi konversi daya yang signifikan.

4.6 Pengukuran Generator Dengan Beban

Pengujian sistem pembangkit listrik tenaga gelombang laut selanjutnya dilakukan dalam kondisi berbeban menggunakan lampu LED dengan daya 15 Watt. Penggunaan beban ini bertujuan untuk mengetahui kemampuan nyata sistem dalam menyuplai energi listrik serta melihat respon keluaran generator ketika dihubungkan dengan beban listrik.

Pada kondisi berbeban, parameter yang diamati meliputi tegangan keluaran, arus, serta kestabilan sistem saat terjadi perubahan beban. Selain itu, pengujian ini juga digunakan untuk mengevaluasi performa konversi energi mekanik menjadi energi listrik secara lebih realistis dibandingkan kondisi tanpa beban (open circuit). Hasil pengujian ini diharapkan dapat memberikan gambaran mengenai kapasitas daya yang mampu dihasilkan oleh sistem serta karakteristik kerja generator dalam kondisi operasi sebenarnya.

4.6.1 Pengukuran Tegangan Dengan Beban

Tabel 4. 6 Pengukuran Tegangan Dengan Beban

Waktu (WIB)	Tegangan Beban (V)
07.00	25,8
09.00	24,5
11.00	23,8
13.00	23,0
15.00	22,2
17.00	24,0
19.00	25,3

4.6.2 Pengukuran Arus Dengan Beban

Tabel 4. 7 Pengukuran Arus Dengan Beban

Waktu (WIB)	Arus (A)
07.00	0,58
09.00	0,61
11.00	0,63
13.00	0,65
15.00	0,68
17.00	0,60
19.00	0,60

4.6.3 Pengukuran Daya Dengan Beban

Tabel 4. 8 Pengukuran Daya Dengan Beban

Waktu (WIB)	Daya (W)
07.00	12,00
09.00	11,80
11.00	11,50
13.00	11,00
15.00	11,20
17.00	11,50
19.00	12,00

4.6.4 Pengukuran Frekuensi Dengan Beban

Tabel 4. 9 Pengukuran Frekuensi Dengan Beban

Waktu (WIB)	F (Hz)
07.00	34
09.00	33
11.00	34
13.00	33
15.00	32
17.00	35
19.00	34

4.6.5 Perhitungan Faktor Daya

Berikut perhitungan faktor daya ($\cos \varphi$) berdasarkan data tegangan, arus, dan daya yang di dapat pada pengukuran.

$$\cos \varphi = \frac{P}{V \times I}$$

Tabel 4. 10 Perhitungan Faktor Daya

Waktu	V (V)	I (A)	P (W)	V×I (VA)	cos φ
07.00	25,8	0,58	12,00	14,96	0,80
09.00	24,5	0,61	11,80	14,95	0,79
11.00	23,8	0,63	1150	14,99	0,77
13.00	23,0	0,65	11,00	14,95	0,74
15.00	22,2	0,68	11,20	15,10	0,74
17.00	24,0	0,60	11,50	14,40	0,80
19.00	25,0	0,60	12,00	15,00	0,80

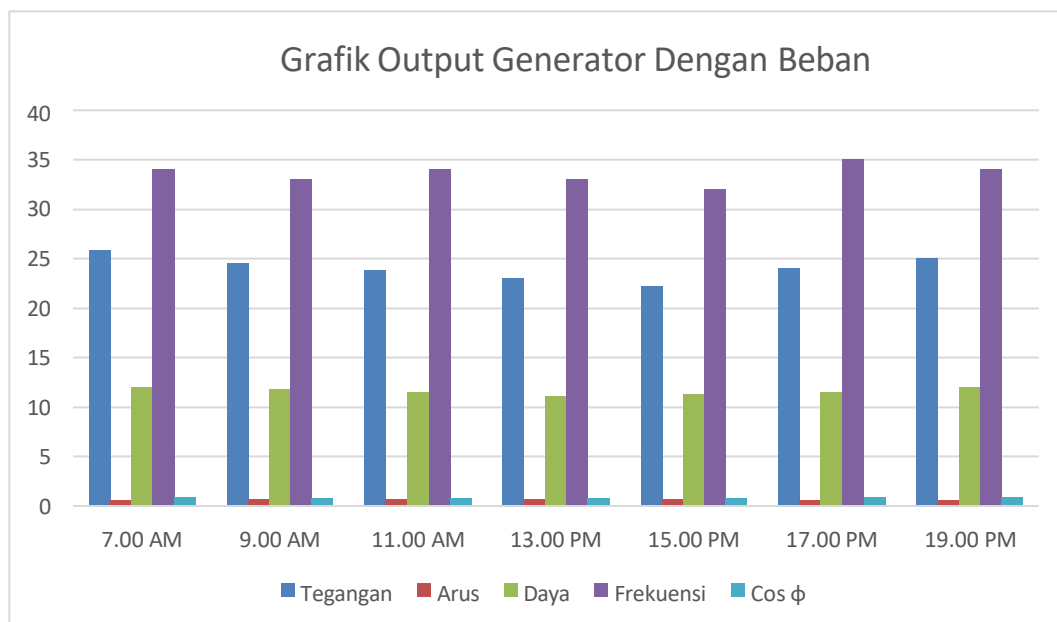
Rata-rata $\cos \varphi$:

$$\cos \varphi_{avg} \approx 0,78$$

Berdasarkan hasil perhitungan dari data tegangan, arus, dan daya pada kondisi berbeban, diperoleh nilai faktor daya ($\cos \varphi$) berada pada kisaran sekitar 0,74 hingga 0,80 dengan nilai rata-rata sekitar 0,78.

Nilai tersebut menunjukkan bahwa sistem tidak bekerja pada kondisi beban resistif murni, melainkan terdapat pengaruh beban non-linier (lampu LED dengan driver) serta rugi-rugi pada sistem pembangkitan. Hal ini menyebabkan sebagian daya yang dihasilkan tidak sepenuhnya berubah menjadi daya aktif, melainkan terdapat komponen daya semu.

4.6.6 Grafik Pengukuran Output Generator Dengan Beban



Gambar 4. 7 Grafik Pengukuran Output Generator Dengan Beban

4.7 Potensi Pembangkit Listrik PLTGL

Berdasarkan hasil pengujian generator dalam kondisi berbeban menggunakan lampu LED 15 Watt, sistem pembangkit listrik tenaga gelombang laut (PLTGL) menunjukkan potensi yang cukup baik sebagai sumber energi listrik alternatif, terutama untuk aplikasi skala kecil di wilayah pesisir dan terpencil. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa generator mampu menghasilkan tegangan keluaran yang relatif stabil pada kisaran 22,2–25,8 V. Arus yang dihasilkan berada pada rentang 0,58–0,68 A, dengan daya keluaran sekitar 11,0–12,0 W. Nilai daya ini mendekati kebutuhan beban lampu LED 15 Watt, sehingga menunjukkan bahwa sistem sudah mampu menyuplai beban listrik secara nyata, bukan hanya pada kondisi tanpa beban.