

BAB 4

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

4.1 Gambaran Umum Objek Penelitian

Topik yang dijadikan objek penelitian oleh penulis adalah potensi pemanfaatan pembangkit listrik tenaga gelombang laut di Perairan Selatan Pulau Jawa. Perairan Selatan Pulau Jawa dipilih karena lokasinya yang berhadapan langsung dengan Samudera Hindia sehingga memiliki gelombang yang cukup tinggi. Ada pun gambaran umum mengenai objek penelitian tersebut disajikan dalam subbab-subbab berikutnya.

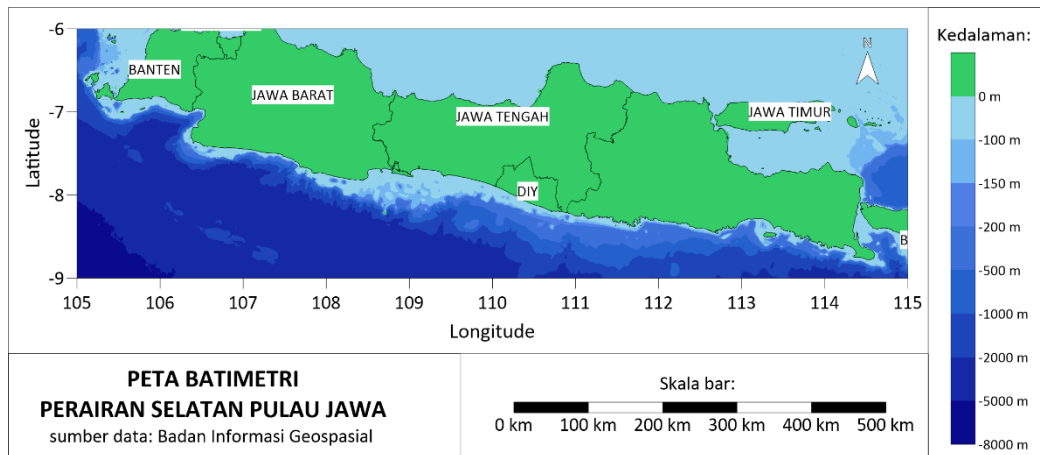
4.1.1 Letak Geografis

Sesuai namanya, Perairan Selatan Pulau Jawa berada di Selatan Pulau Jawa. Dalam penelitian ini batasan astronomis lokasi yang ditetapkan adalah 105 – 115 °BT dan 6 – 9 °LS. Adapun batas-batas geografis wilayah kajian adalah sebagai berikut:

sebelah utara	: Pulau Jawa
sebelah selatan	: Samudera Hindia
sebelah barat	: Selat Sunda
sebelah timur	: Selat Bali

4.1.2 Batimetri

Batimetri adalah ukuran kedalaman perairan yang digunakan untuk memperoleh gambaran bentuk atau kontur dasar perairan (Lubis *et al.*, 2018). Berkaitan dengan pembangunan di wilayah laut dan pesisir, informasi mengenai batimetri adalah hal yang penting untuk dianalisis, termasuk dalam kajian spasial penentuan lokasi PLTGL. Batimetri Perairan Selatan Pulau Jawa digambarkan dalam peta batimetri pada Gambar 4.1. Perairan Selatan Pulau Jawa memiliki karakteristik yang curam, di mana semakin menuju selatan kedalaman terus bertambah. Kedalaman perairan di lokasi kajian berkisar hingga 7.400 m.



Gambar 4.1 Peta Batimetri Perairan Selatan Pulau Jawa

Sumber: BIG (2018) diolah oleh Peneliti (2022)

4.1.3 Potensi Pemanfaatan PLTGL di Perairan Selatan Pulau Jawa

Perairan Selatan Pulau Jawa memiliki gelombang yang cukup tinggi sehingga potensial untuk dimanfaatkan sebagai sumber energi. Salah satu penelitian terdahulu yang telah mengkaji potensi tersebut adalah Pratomo dan Soebari (2020) yang mengalkulasi potensi energi gelombang laut di Perairan Selatan Pulau Jawa pada Bulan Februari berkisar antara 0,5 – 7 kW/m. Pengembangan PLTGL di Perairan Selatan Pulau Jawa juga telah dilakukan, salah satunya adalah oleh BPPT yang telah mengembangkan PLTGL tipe OWC dan PLTA yang bersumber dari gelombang laut, serta PLTAGL yang bersumber dari energi kinetik arus laut dan energi potensial gelombang laut. Sampai saat ini, perkembangan PLTGL di Indonesia masih berada dalam tahapan penelitian dan pengembangan dan belum dikomersialkan.

4.2 Hasil Pengumpulan Data

Pengumpulan data dalam penelitian ini dilakukan melalui wawancara dan telaah dokumen. Data yang diperoleh berasal dari beragam sumber. Ada pun data-data yang telah berhasil dikumpulkan di jelaskan pada sub subbab berikut.

4.2.1 Potensi Pemanfaatan PLTGL

Data awal yang dibutuhkan dalam menganalisis potensi pemanfaatan PLTGL terbagi menjadi data kualitatif dan data kuantitatif. Data kualitatif dikumpulkan melalui wawancara dan telaah dokumen dalam penelitian ini. Data kualitatif yang dikumpulkan meliputi informasi mengenai potensi energi gelombang laut di Indonesia khususnya di Perairan Selatan Pulau Jawa serta upaya-upaya yang telah dilakukan dalam pengembangan PLTGL. Data kuantitatif juga diperlukan dalam penelitian ini. Ada pun data kuantitatif yang diperoleh dalam penelitian ini diperinci pada anak sub-subbab ini. Data kuantitatif yang diperoleh digunakan untuk mengalkulasi potensi energi gelombang laut di Perairan Selatan Pulau Jawa. Hasil yang diperoleh dari pengolahan data kualitatif dan kuantitatif akan dikombinasikan untuk menganalisis lebih lanjut potensi pemanfaatan PLTGL di Perairan Selatan Pulau Jawa.

4.2.1.1 Data Model Gelombang Laut

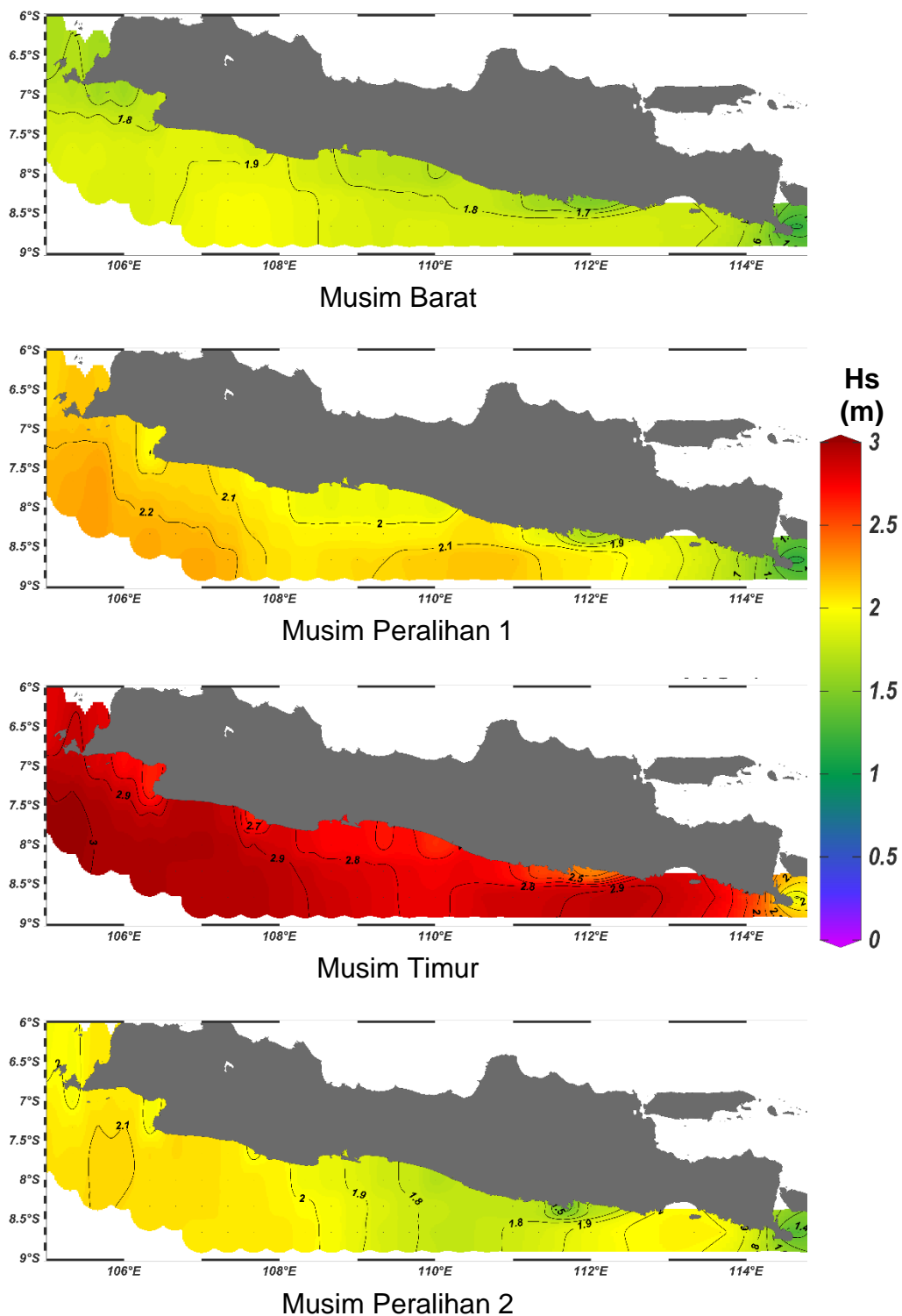
Data model gelombang laut diunduh dari *Copernicus Marine Environment Monitoring Service* (CMEMS). Data model gelombang tersedia dan dapat diunduh di laman <http://marine.copernicus.eu/services-portfolio/>. Data diunduh dalam format ekstensi NetCDF (*.nc) yang berisi data array parameter gelombang

Data yang diunduh adalah parameter tinggi gelombang signifikan (H_s) dalam satuan meter, periode puncak ke puncak gelombang (T_p) dalam satuan detik, dan arah rambat dominan dalam derajat mata angin. Data model gelombang dihasilkan melalui sistem prakiraan *Météo-France* berbasis model MFWAM yang merupakan model gelombang generasi ketiga dengan kode komputasi ECWAM-IFS-38R2 (Ardhuin *et al.* 2010). Data model gelombang laut yang dihasilkan memiliki resolusi spasial sebesar 1/12 derajat dan menghasilkan data gelombang sesaat setiap tiga jam. Data yang diunduh memiliki batasan wilayah 105 – 115 °BT dan 6 – 9

°LS sesuai dengan batas kajian yang telah disebutkan dalam sub subbab 4.1.1 Letak Geografis. Data yang diunduh²⁰ merupakan data pada tiga tahun terakhir yakni dengan rentang waktu dari tanggal 1 Januari 2019 sampai 16 Desember 2021.

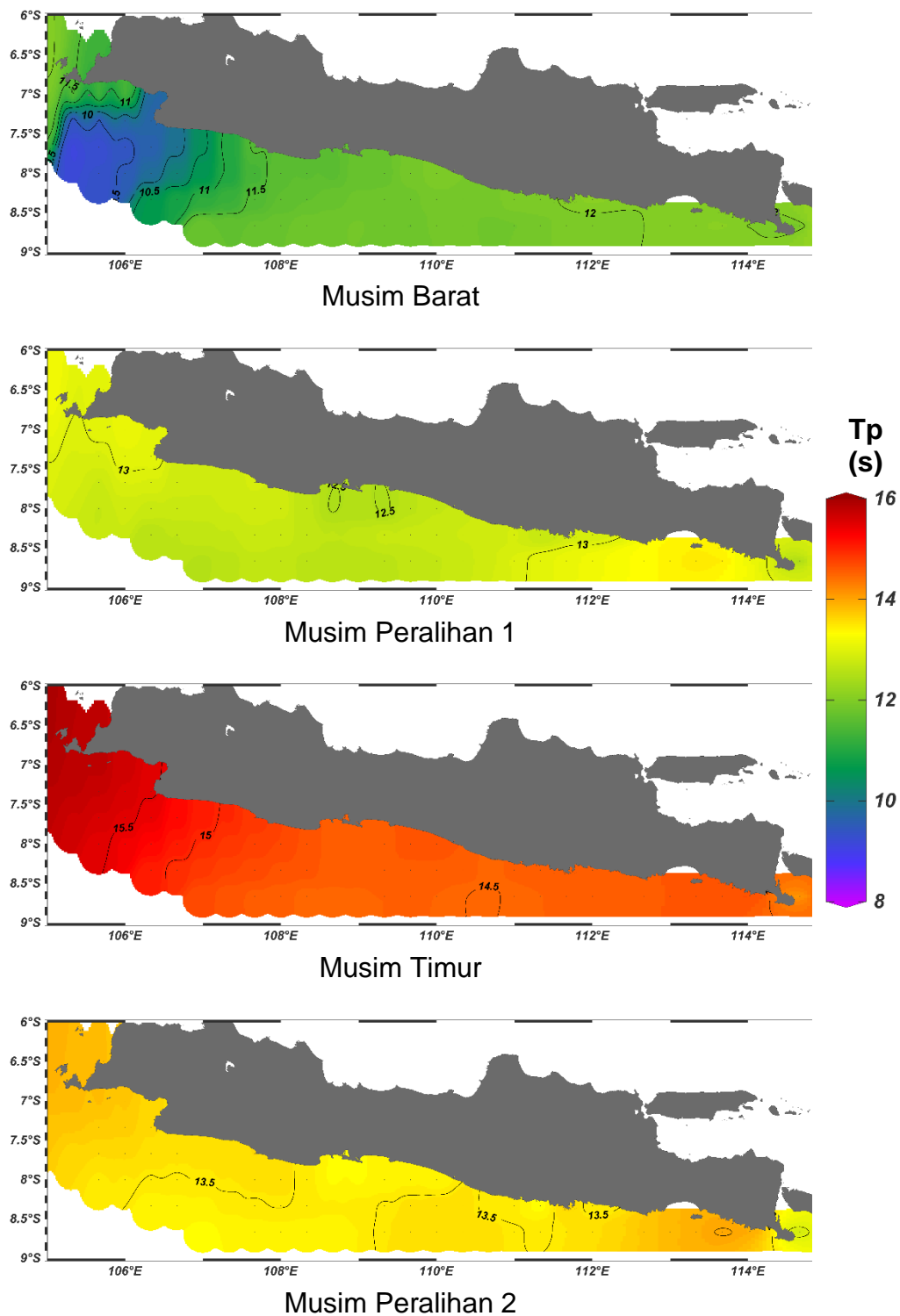
Gelombang laut di Perairan Selatan Pulau Jawa disajikan melalui sebaran spasial tinggi gelombang signifikan (H_s) dan periode puncak ke puncak gelombang (T_p). Gambar 4.2 menunjukkan sebaran spasial tinggi gelombang signifikan, sedangkan Gambar 4.3 menunjukkan sebaran spasial periode puncak ke puncak gelombang. Data dicuplik pada empat waktu berbeda untuk mewakili setiap musim, yakni 15 Januari 2021 mewakili musim barat, 15 April 2021 mewakili musim peralihan 1, 15 Juli 2021 mewakili musim timur, dan 15 Oktober 2021 mewakili musim peralihan 2, di mana semuanya memiliki keterangan waktu 06.00 waktu GMT atau 13.00 WIB.

Gelombang laut di Perairan Selatan Pulau bervariasi setiap musimnya. Dari data yang ditampilkan, keempat waktu yang dicuplik menunjukkan tinggi gelombang signifikan berkisar antara 1,6 – 3,0 meter, sedangkan periodenya berkisar antara 10 – 16 detik. Karakteristik tersebut berada pada derajat 5 – 6 pada Douglas sea scale (Tabel 2.1), sehingga tergolong dalam laut sedang menuju kasar.



Gambar 4.2 Tinggi Gelombang Signifikan

Sumber: Copernicus (2021) diolah oleh Peneliti (2022)



Gambar 4.3 Periode Puncak ke Puncak Gelombang

Sumber: Copernicus (2021) diolah oleh Peneliti (2022)

Tabel 4.1 Douglas Sea Scale

Derajat	Tinggi Gelombang (m)	Keterangan
0	0.00	<i>calm sea</i>
1	0.00–0.10	<i>rippled sea</i>
2	0.10–0.50	<i>smooth sea</i>
3	0.50–1.25	<i>slight sea</i>
4	1.25–2.50	<i>moderate sea</i>
5	2.50–4.00	<i>rough sea</i>
6	4.00–6.00	<i>very rough sea</i>
7	6.00–9.00	<i>high sea</i>
8	9.00–14.00	<i>very high sea</i>
9	>14.00	<i>phenomenal sea</i>

Sumber: Hefazi dan Grote (2021)

Tinggi dan periode gelombang di Perairan Selatan Pulau Jawa bervariasi setiap musimnya. Ini sesuai dengan teori yang telah disebutkan dalam sub subbab 2.1.4 Gelombang Laut di mana gelombang laut dipengaruhi oleh pola angin di setiap musimnya. Data pada tanggal 15 Juli 2021 (musim timur) menunjukkan gelombang yang tinggi dengan periode yang lama. Hal tersebut dikarenakan pada musim timur angin berhembus dari Australia menuju Asia, sehingga wilayah Perairan Selatan Pulau Jawa mendapat *fetch* dan dorongan angin yang lebih besar untuk menghasilkan gelombang tinggi. Pada musim barat, berlaku hal yang sebaliknya di mana angin berhembus dari Asia yang telah terhalang banyak gugus kepulauan Indonesia, sehingga data pada tanggal 15 Januari 2021 menunjukkan tinggi dan periode gelombang yang cenderung kecil di Perairan Selatan Pulau Jawa.

4.2.1.2 Data Batimetri

Data batimetri diperlukan untuk mengkaji wilayah dengan kedalaman yang cocok untuk PLTGL. Data batimetri yang digunakan adalah data batimetri nasional (batnas) yang disediakan Badan Informasi Geospasial (BIG) di laman <https://tanahair.indonesia.go.id/demnas/>. Data batnas dibentuk dari hasil inversi data anomali gravitasi yang dihasilkan melalui

pengolahan data altimetri ditambah dengan hasil pemeruman yang dilakukan oleh BIG, NGDC, BODC, BPPT, LIPI, P3GL dan lembaga lainnya dengan survei *single* maupun *multibeam*. Resolusi spasial data BATNAS adalah 6arc-second dengan menggunakan datum MSL (BIG, 2018). Data yang diunduh adalah dua data raster yang meliputi area 105 – 115 °BT dan 5 – 10 °LS dengan keterangan versi 1.5 yang merupakan data terbaru.

4.2.1.3 Peta Jaringan Listrik

Peta jaringan listrik diperlukan untuk meninjau lokasi jaringan listrik yang dapat dijangkau oleh PLTGL. Peta jaringan listrik disediakan oleh KESDM melalui ESDM One Map sub sektor ketenagalistrikan di laman <https://geoportal.esdm.go.id/ketenagalistrikan/>. Informasi geospasial subsektor ketenagalistrikan pada ESDM One Map disajikan untuk menghasilkan peta kelistrikan nasional dengan satu baseline, standard, database dan geoportal yang sangat berguna untuk memaksimalkan pemanfaatan ruang dalam pelaksanaan proyek dan program strategis pemerintah khususnya sub sektor ketenagalistrikan (KESDM) . Ada pun wilayah yang dicuplik berfokus pada jaringan listrik Jawa-Madura-Bali (Gambar 4.8). Lokasi-lokasi gardu induk yang paling dekat dengan Perairan Selatan Pulau Jawa dicatat dalam Tabel 4.3.

4.2.1.4 Jenis Konverter Energi Gelombang

Jenis konverter energi gelombang dibutuhkan untuk membangun skenario kalkulasi potensi energi gelombang di Perairan Selatan Pulau Jawa. Dalam penelitian ini, skenario yang dibangun oleh peneliti adalah penggunaan PLTGL lepas pantai berkaitan dengan ketersediaan data gelombang yang digunakan dalam penelitian ini yang tersedia di perairan dalam. Mengacu pada penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Ramos *et al.*, (2021), Guillou dan Chapalain (2018), Santos *et al.* (2018), Rusu dan Onea (2018), Reikard *et al.* (2015), serta Gonçalves *et al.* (2014),

setidaknya ada tiga jenis konverter yang biasa digunakan dalam kalkulasi potensi energi gelombang laut di lepas pantai, yakni *Attenuator*, *Point Absorber*, dan *Terminator*.

Ketiga alat konverter energi gelombang tersebut memiliki tipe berbeda. Gambar ketiga alat telah ditunjukkan pada Gambar 2.6. Adapun karakteristik untuk masing-masing alat disajikan pada Tabel 4.2. Salah satu parameter penting dari jenis konverter yang dipilih adalah matriks energi. Matriks energi dari masing-masing alat tersedia pada Gambar 4.4.

Tabel 4.2 Karakteristik Konverter Energi Gelombang

Type	Dimensi (m)	Rated Power (kW)	Working Depth (m)	Project status
Attenuator	4x180	750	>50	Aguçadoura, Portugal, full scale P1 (2005)/ Orkney, Scotland, full scale P2 (2010). Currently decomissioned.
Point Absorber	6(∅)	250	>50	Newport, Oregon, prototype testing (2007)
Terminator	300x170	7000	>25	Nissum Bredning, Denmark, prototype testing (2003-2009)

Sumber: Ramos *et al.* (2021)

		Tp (s)												
		5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Hs (m)	1		29	37	38	35	29	23						
	1.5	32	65	83	86	78	65	53	42	33				
	2	57	115	148	152	138	116	93	74	59				
	2.5	89	180	231	238	216	181	146	116	92				
	3	129	260	332	332	292	240	210	167	132				
	3.5		354	438	424	377	326	260	215	180				
	4		462	540	530	475	384	339	267	213				
	4.5		544	642	628	562	473	382	338	266				
	5			726	707	670	557	472	369	328				
	5.5			750	750	737	658	530	446	355				

		5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Hs (m)	1			8	11	12	11	10	8	7				
	1.5		13	17	25	27	26	23	19	15	12	12	12	7
	2		24	30	44	49	47	41	34	28	23	23	23	12
	2.5		37	47	69	77	73	64	54	43	36	36	36	19
	3		54	68	99	111	106	92	77	63	51	51	51	27
	3.5				135	152	144	126	105	86	70	70	70	38
	4				122	176	198	188	164	137	112	91	91	49
	4.5				223	250	239	208	173	142	115	115	115	62
	5				250	250	250	250	214	175	142	142	142	77
	5.5				250	250	250	250	250	211	172	172	172	92

		5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Hs (m)	1	160	250	360	360	360	360	360	360	320	280	250	220	180
	1.5	400	475	600	630	775	775	775	775	695	615	540	465	385
	2	640	700	840	900	1190	1190	1190	1190	1070	950	830	710	590
	2.5		1075	1225	1325	1595	1905	1905	1905	1715	1525	1335	1140	950
	3		1450	1610	1750	2000	2620	2620	2620	2360	2100	1840	1570	1310
	3.5			2225	2485	2855	3410	3970	3970	3395	3015	2640	2260	1885
	4			2840	3220	3710	4200	5320	5320	4430	3930	3440	2950	2460
	4.5				3915	4515	5110	6160	6160	5610	5010	4345	3450	2880
	5				4610	5320	6020	7000	7000	6790	6090	5250	3950	3300
	5.5					6020	6510	7000	7000	6895	6545	6055	4530	3750

**Gambar 4.4 Matriks energi
(atas-bawah: Attenuator, Point Absorber, Terminator)**

Sumber: Guillou & Chapalain (2018) dan Santos *et al.* (2018)

4.2.2 Kendala pengembangan PLTGL

Informasi mengenai kendala pengembangan PLTGL dikumpulkan melalui pengumpulan data kualitatif. Wawancara dilakukan dengan narasumber yang juga merupakan pihak yang berkaitan erat dengan pengembangan PLTGL di Indonesia, baik dari sisi peneliti yang menekuni langsung pengembangan PLTGL atau dari pemerintah selaku pembuat kebijakan. Selain itu, data mengenai kendala pengembangan PLTGL juga diperoleh melalui dan telaah dokumen. Ketiga sumber ini kemudian diolah lebih lanjut untuk memetakan apa saja yang menjadi kendala pengembangan PLTGL di Indonesia khususnya Perairan Selatan Pulau Jawa.

4.2.2 Upaya pengembangan PLTGL

Informasi mengenai upaya pengembangan PLTGL diperoleh melalui penelusuran data kualitatif yang didapat melalui wawancara dan telaah dokumen. Data kualitatif yang diperoleh antara lain digunakan untuk menjelaskan bagaimana target atau upaya pengembangan PLTGL di Indonesia baik dari sisi pemerintah sebagai perencana ataupun dari sisi peneliti yang telah mengembangkan PLTGL. Strategi pengembangan PLTGL juga disusun berdasarkan analisa yang diperoleh dari hasil-hasil yang didapat dari pengumpulan data dan pengolahan data.

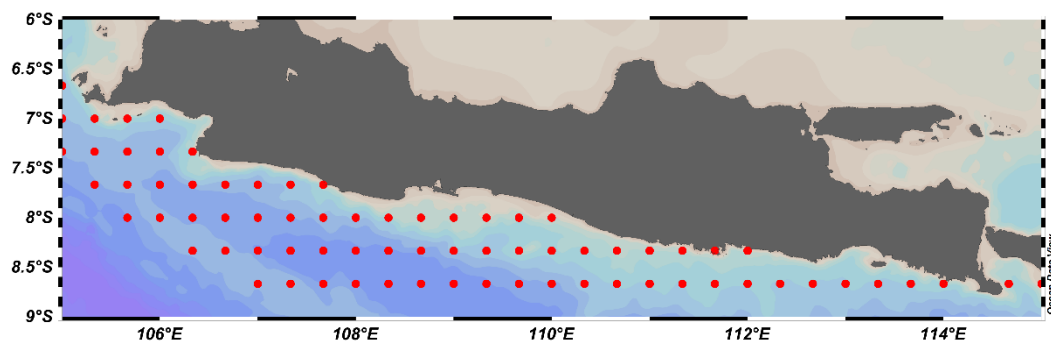
4.3 Hasil Pengolahan Data

Data yang telah dikumpulkan kemudian diolah oleh Peneliti. Pengolahan data dilakukan untuk memperoleh informasi baru dari data yang telah dikumpulkan. Informasi yang didapat dalam pengolahan data kemudian dikategorisasi dan divisualisasikan untuk menunjang analisis selanjutnya yang dilakukan peneliti. Ada pun informasi yang diperoleh dari pengolahan data yang dilakukan oleh peneliti dijelaskan dalam beberapa sub subbab berikut.

4.3.1 Potensi Pemanfaatan PLTGL

4.3.1.1 Potensi Spasial Energi Gelombang Laut

Data model gelombang yang telah diunduh kemudian diolah untuk mengalkulasi fluks energi gelombang. Langkah pertama seleksi data agar sesuai dengan fokus kajian. Seleksi dilakukan dengan memilih titik lokasi data yang sesuai dengan obyek penelitian, yakni Perairan Selatan Pulau Jawa. Seleksi dilakukan dengan menghapus data d luar Perairan Selatan Pulau Jawa dan titik data yang berada di darat. Selain itu, titik yang memiliki nilai NaN atau data kosong juga dihilangkan agar tidak merusak kalkulasi. Ada pun sebaran titik data yang digunakan disajikan pada Gambar 4.5.



Gambar 4.5 Peta Sebaran Titik Data Model Gelombang

Sumber: Copernicus (2021) diolah oleh Peneliti (2022)

Kalkulasi fluks energi gelombang didasarkan pada persamaan (2.1). Kalkulasi dilakukan menggunakan Microsoft Excell dan visualisasi data menggunakan ODV. Sebaran spasial fluks energi gelombang disajikan pada .Data yang divisualisasikan merupakan rerata dari data fluks energi gelombang per tiga jam dari tiga tahun terakhir (1 Januari 2019 – 16 Desember 2021). Melalui perangkat lunak ODV, dilakukan *gridding* data sehingga didapat sebaran spasial Fluks Energi Gelombang yang diwakili dengan skala warna pelangi pada Gambar 4.6.

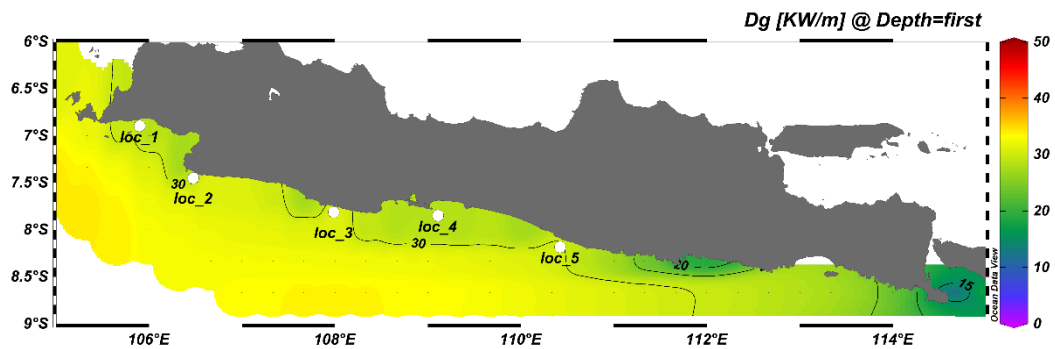
Nilai fluks energi gelombang yang telah dikalkulasikan menunjukkan nilai rerata 20 – 35 kW/m. Semakin menjauhi daratan, nilai fluks energi gelombang semakin tinggi. Variasi spasial yang didapat cenderung sama, terkecuali wilayah Selatan Jawa Timur yang cenderung kecil. Nilai rerata fluks energi gelombang di wilayah Selatan Jawa Timur hanya berkisar 15-25 kW/m.

4.3.1.2 Seleksi Batimetri

Seleksi batimetri dilakukan untuk menunjukkan lokasi dengan kedalaman yang diinginkan. Mengacu pada Tabel 4.2, ketiga alat bekerja di kedalaman lebih dari 50 m. Peneliti juga menambahkan batasan untuk kedalaman yakni di bawah 75 m, hal ini dimaksudkan agar kedalaman lokasi tidak menyulitkan instalasi konverter energi gelombang. Rentang kedalaman 50 – 75 m ini juga mengacu pada penelitian terdahulu yang dilakukan oleh Rusu dan Onea (2018), Guillou dan Chapalain (2018), serta Santos *et al.*, (2018). menunjukkan wilayah dengan kedalaman yang telah diseleksi.

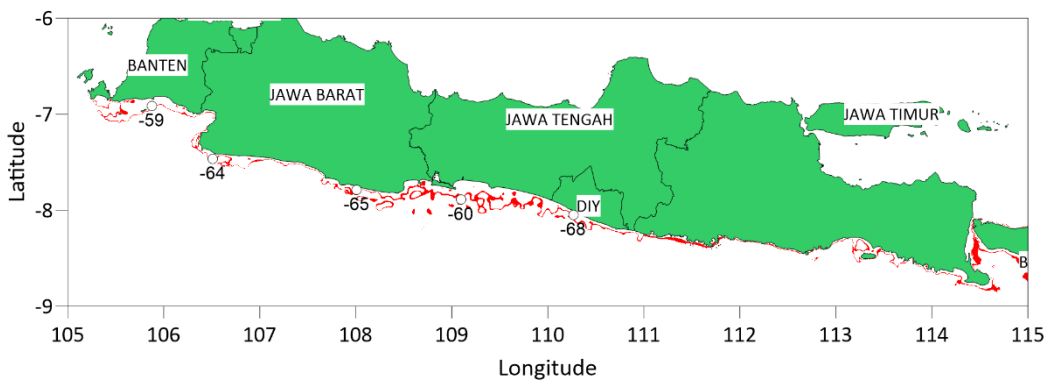
4.3.1.3 Penentuan Lokasi PLTGL

Penentuan skenario penempatan PLTGL ditentukan berdasarkan sebaran spasial fluks energi gelombang (Gambar 4.6), kedalaman batimetri (Gambar 4.7), dan jarak dengan gardu induk (Gambar 4.8). Dari ketiga kriteria tersebut, dipilih 5 lokasi (Gambar 4.6 dan Tabel 4.4) yang menjadi fokus analisis selanjutnya. Kelima titik tersebut memiliki kedalaman yang berada pada rentang 50 – 75 m berdasarkan penelitian terdahulu yang dilakukan oleh Rusu dan Onea (2018), Guillou dan Chapalain (2018), serta Santos *et al.*, (2018). Kedalaman masing-masing lokasi ditampilkan pada Gambar 4.7.



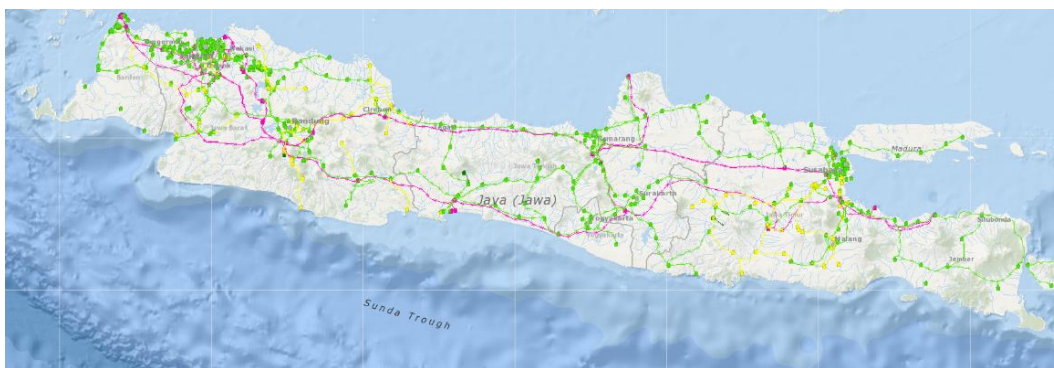
Gambar 4.6 Sebaran Spasial Fluks Energi Gelombang

Sumber: Copernicus (2021) diolah oleh Peneliti (2022)



Gambar 4.7 Wilayah dengan Kedalaman 50 - 75 m (■)

Sumber: BIG (2018) diolah oleh Peneliti (2022)



Gambar 4.8 Peta Jaringan Listrik Jawa-Madura-Bali

Sumber: KESDM (2021)

Tabel 4.3 Gardu Induk di Pesisir Selatan Jawa

lon	lat	Gardu Induk	kapasitas	Provinsi
106.0327	-6.748	Malimping	150 kV	Banten
106.2525	-6.9389	Bayah	150 kV	Banten
106.5381	-7.0043	Pelabuhan Ratu	70 kV, 150 kV	Jawa Barat
107.7137	-7.6526	Pameungpeuk	70 kV	Jawa Barat
108.1201	-7.6362	Tasikmalaya Baru	150 kV	Jawa Barat
108.1259	-7.635	Karangnunggal	150 kV	Jawa Barat
108.6914	-7.669	Pangandaran	70 kV	Jawa Barat
109.0869	-7.688	Cilacap	70 kV, 150 kV, 500 kV	Jawa Tengah
110.0908	-7.8934	Wates	150 kV	DIY
111.3735	-8.2571	Pacitan	150 kV	Jawa Timur
111.7951	-8.2531	Tulungagung	70 kV	Jawa Timur
113.4945	-8.3434	Puger	150 kV	Jawa Timur

Sumber: KESDM (2018) dan diseleksi oleh Peneliti (2022)

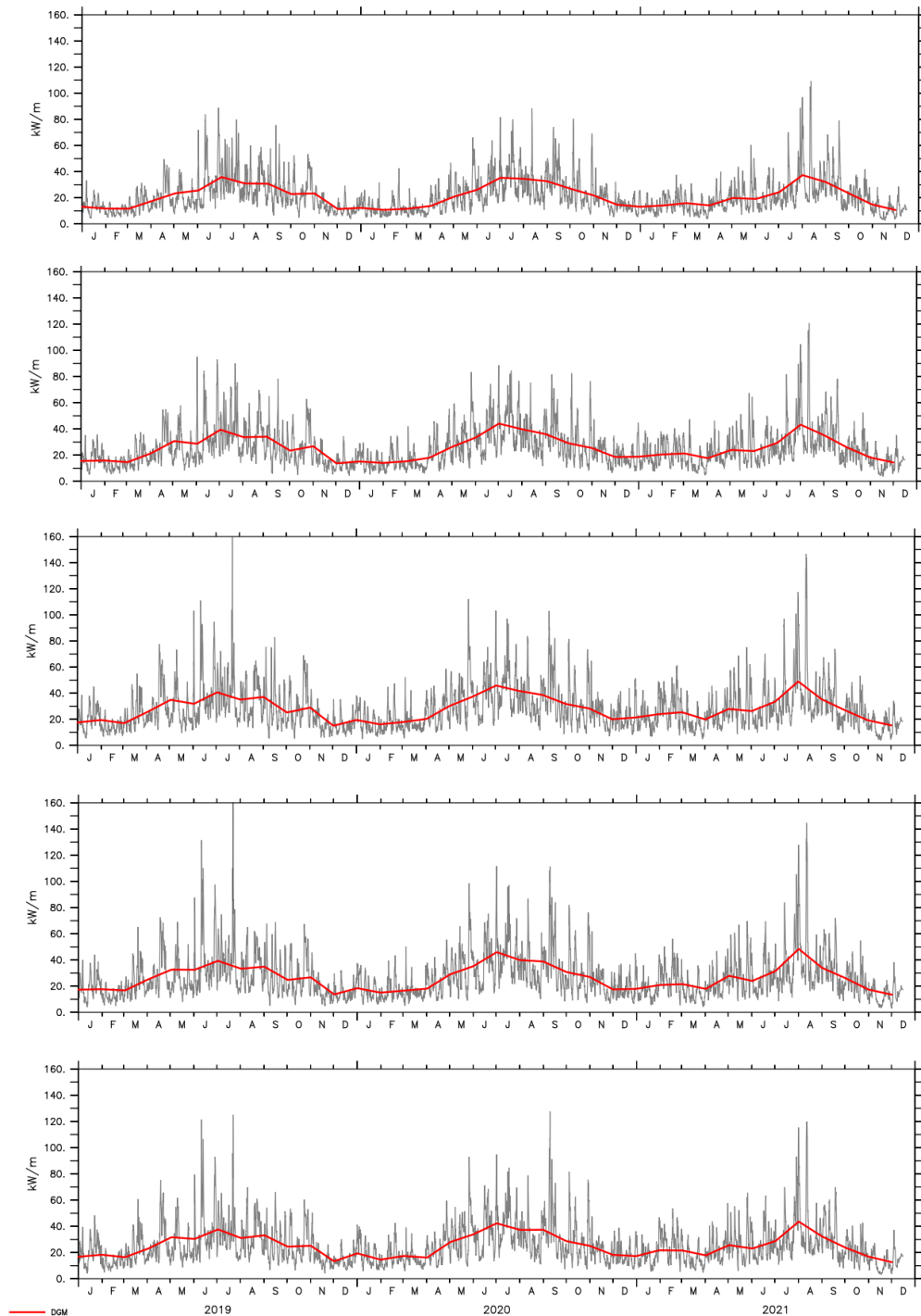
Tabel 4.4 Lokasi Skenario Penempatan PLTGL

Lokasi	Lon	Lat	Kedalaman (m)	Keterangan	Gardu Terdekat	Profil Menuju Gardu Terdekat
1	105.8981	-6.8962	-13	Binuangeun	Malimping	
2	106.4771	-7.4484	-19	Ujung Genteng	Pelabuhan Ratu	
3	107.9867	-7.8135	-42	Tasikmalaya	Karangnunggal	
4	109.1089	-7.8492	-32	Cilacap	Cilacap	<p>Profile 7</p>

Lokasi	Lon	Lat	Kedalaman (m)	Keterangan	Gardu Terdekat	Profil Menuju Gardu Terdekat
5	110.422	-8.182	-26	Bantul	Wates	

Sumber: BIG (2018) diolah oleh Peneliti (2022)

4.3.1.4 Sebaran Temporal Fluks Energi Gelombang



Gambar 4.9 Grafik Deret Waktu Fluks Energi Gelombang

(atas – bawah: lokasi 1 – 5)

Sumber: Copernicus (2021) diolah oleh Peneliti (2022)

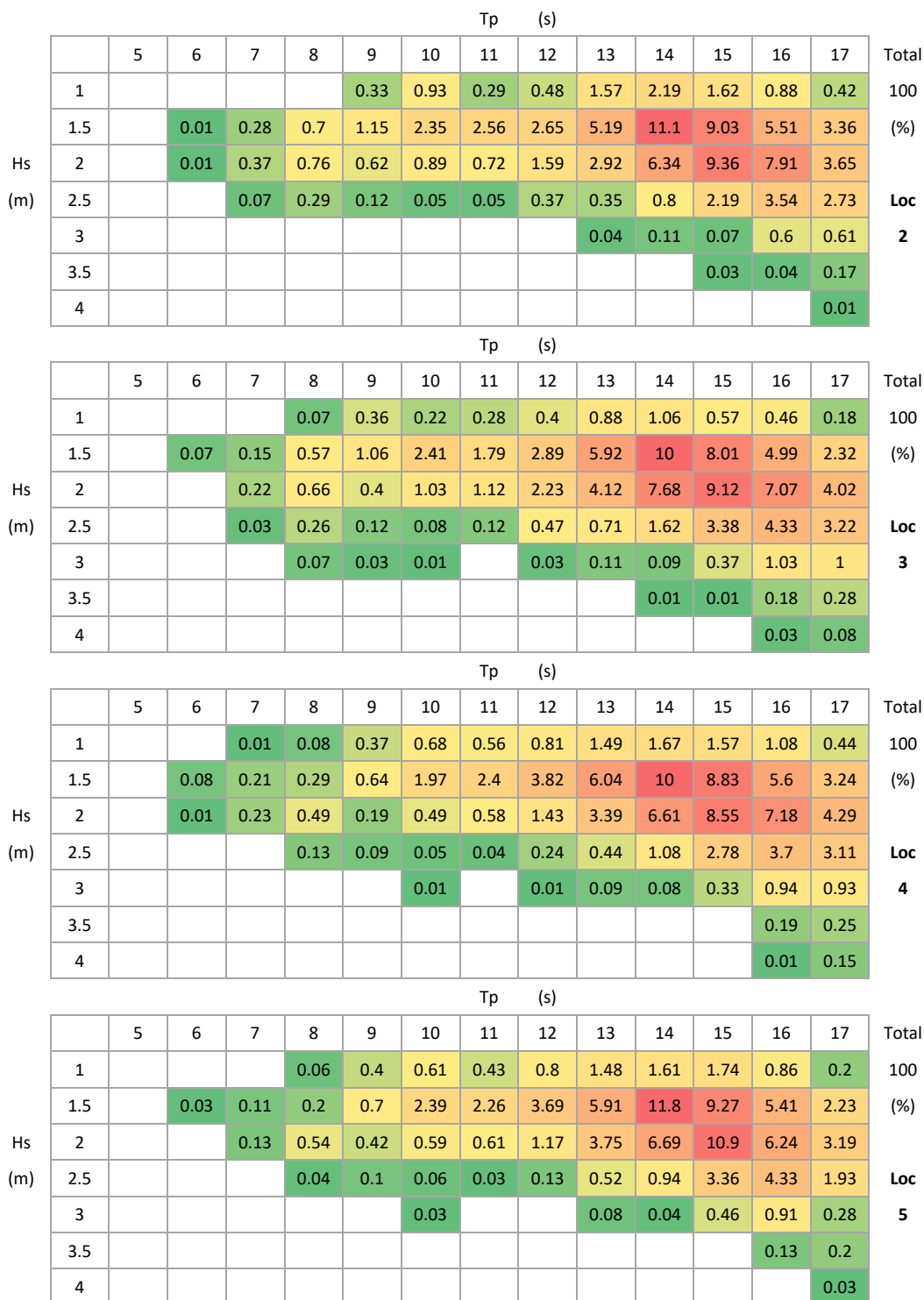
Gambar 4.9 menunjukkan grafik deret waktu fluks energi gelombang di setiap lokasi. Grafik tersebut diolah menggunakan pyferret dengan *program code* yang telah disusun oleh peneliti (terlampir). Plot garis berwarna hitam merupakan sebaran data fluks energi gelombang di masing-masing lokasi, sedangkan garis berwarna merah merupakan penghalusan data menggunakan rerata per bulan.

Fluks energi gelombang yang ditampilkan di kelima lokasi menunjukkan pola variabilitas yang mirip. Fluks energi gelombang yang cukup tinggi ditemukan pada bulan Juni – Agustus, yakni pada saat berlangsungnya musim timur. Pada musim tersebut, rerata bulanan fluks energi gelombang berada di sekitar 30 – 50 kW/m. Pada musim barat (Desember – Februari), fluks energi gelombang relatif lebih rendah, yakni 10 – 20 kW/m.

4.3.1.5 Distribusi Kejadian Gelombang Laut

Data tinggi dan periode gelombang di masing-masing lokasi diekstrak menggunakan program Pyferret untuk dipetakan ke dalam distribusi kejadian gelombang laut melalui Microsoft Excell. Distribusi kejadian gelombang laut dipetakan ke dalam persentase dan dapat digunakan untuk melihat karakter gelombang laut yang ditunjukkan dengan kombinasi tinggi gelombang dan periodenya. Pada distribusi kejadian gelombang laut tersebut, dapat diketahui kombinasi tinggi dan periode gelombang yang dominan, serta menjadi input untuk mengalkulasi potensi energi gelombang.

		Tp (s)													
		5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	Total
Hs (m)	1				0.09	0.63	1.03	1	1.82	4.98	5.34	2.55	0.68	0.56	100
	1.5			0.19	0.33	0.69	0.97	2.04	3.4	9.15	16.8	6.63	3.55	2.8	(%)
	2			0.14	0.35	0.33	0.45	0.4	0.81	3.07	8.5	5.09	4.72	3.44	
	2.5				0.03	0.01	0.01	0.04	0.13	0.3	1.23	0.87	1.65	1.99	Loc
	3									0.05	0.09	0.12	0.23	0.46	1
	3.5										0.03	0.04	0.01	0.14	
	4														



Gambar 4.10 Distribusi Kejadian Gelombang

Sumber: Copernicus (2021) diolah oleh Peneliti (2022)

Gambar 4.10 menunjukkan distribusi kejadian gelombang di masing-masing lokasi. Dari kelima grafik yang ditunjukkan, gelombang di setiap lokasi didominasi oleh kombinasi tinggi gelombang 1,5 – 2 m dan periode 14 – 15 detik. Matriks distribusi kejadian gelombang ini selanjutnya menjadi input dalam kalkulasi potensi energi gelombang pada sub subbab selanjutnya.

4.3.1.6 Potensi Energi Gelombang Laut

Matriks distribusi kejadian gelombang yang telah didapat selanjutnya dikalikan dengan matriks energi dari setiap alat untuk mengetahui daya yang dapat dihasilkan di lokasi tersebut dengan masing-masing alat. Perkalian matriks dilakukan dengan perkalian data *array*, yakni data dengan elemen dari kedua matriks dikalikan sesuai baris dan kolom setiap selnya. Sebagai contoh, Gambar 4.11 merupakan matriks hasil perkalian antara matriks distribusi kejadian gelombang di lokasi 3 dengan matriks energi Terminator.

		Tp (s)													Total
		5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
Hs (m)	1				0.24	1.28	0.81	1	1.42	2.83	2.96	1.42	1.02	0.33	827
	1.5		0.31	0.87	3.57	8.18	18.7	13.9	22.4	41.2	61.6	43.2	23.2	8.94	(kW)
	2			1.88	5.94	4.71	12.2	13.3	26.5	44	73	75.7	50.2	23.7	
	2.5			0.32	3.5	1.89	1.51	2.26	9.05	12.2	24.7	45.1	49.3	30.6	
	3				1.15	0.53	0.35		0.69	2.49	1.94	6.8	16.2	13.1	
	3.5										0.4	0.35	4.17	5.22	
	4												0.78	1.95	

Gambar 4.11 Contoh Hasil Perkalian Matriks Kejadian Gelombang Laut dan Matriks Energi

Sumber: diolah oleh Peneliti (2022) berdasarkan Copernicus (2021), Guillou & Chapalain, (2018), Santos *et al.* (2018)

Tabel 4.5 menunjukkan hasil kalkulasi yang telah dilakukan. Dari kelima lokasi yang dipilih, lokasi tiga yang terletak di selatan Cilacap

memiliki potensi energi yang lebih tinggi dibanding lokasi lain. Sedangkan untuk konverter energi gelombang, Wavebuoy menghasilkan energi yang jauh lebih tinggi dibanding alat lainnya. Selain kalkulasi daya, pada Tabel 4.5 juga dilakukan perhitungan *capacity factor* yang berguna untuk mengukur seberapa baik kinerja alat di setiap lokasi. *Capacity factor* dapat diketahui melalui perbandingan daya yang dapat dihasilkan oleh alat dengan daya maksimal yang mampu diproduksi alat. Dari perhitungan yang dilakukan, skenario yang menghasilkan *capacity factor* terbesar adalah penggunaan Terminator di lokasi tiga. Dari perhitungan yang dilakukan, *capacity factor* yang dihasilkan masih cukup kecil. Hal ini karena ketiga alat yang digunakan dikembangkan di wilayah Eropa Barat dan Amerika Utara dengan karakteristik gelombang yang berbeda dengan Perairan Selatan Pulau Jawa. Oleh sebab itu, diperlukan pengembangan teknologi PLTGL yang lebih spesifik untuk wilayah Perairan Selatan Pulau Jawa. Mengacu pada 484.3.1.5 Distribusi Kejadian Gelombang Laut, gelombang laut di Perairan Selatan Pulau Jawa berkisar antara oleh kombinasi tinggi gelombang 1,5 – 2 m dan periode 14 – 15 detik, maka teknologi yang dikembangkan harus bisa bekerja optimal pada gelombang tersebut.

Tabel 4.5 Potensi Energi Gelombang Laut

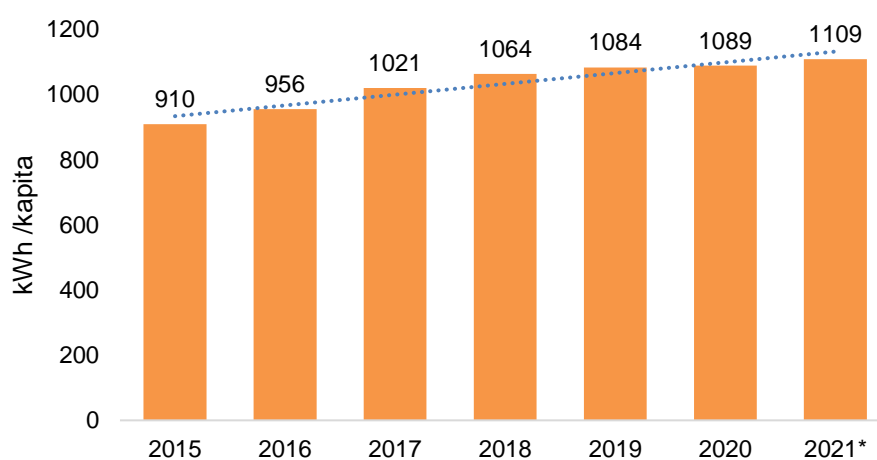
Lokasi	Kalkulasi Daya (kW)			Capacity Factor (%)		
	Attenuator	Point Absorber	Terminator	Attenuator	Point Absorber	Terminator
1	13.08	16.24	679.22	1.74	6.50	9.70
2	17.17	19.66	749.34	2.29	7.86	10.70
3	18.62	21.93	827.31	2.48	8.77	11.82
4	14.67	19.63	764.95	1.96	7.85	10.93
5	14.70	19.96	769.18	1.96	7.98	10.99

Sumber: diolah oleh Peneliti (2022) berdasarkan Copernicus (2021), Guillou & Chapalain, (2018), Santos et al., (2018)

4.3.1.7 Potensi Pemanfaatan PLTGL

Seiring dengan perkembangan teknologi dan kemajuan zaman, konsumsi energi khususnya energi listrik terus meningkat. Konsumsi listrik

Indonesia mencapai 1.109 kilowatt jam (kWh) per kapita pada kuartal ketiga tahun 2021. Menurut Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (KESDM), secara tren sejak tahun 2015 konsumsi listrik per kapita di Indonesia terus meningkat. Peningkatan terbesar yang terjadi pada tahun 2017 sebesar 6,8%, sedangkan peningkatan terkecil yang terjadi pada tahun 2020 sebesar 0,4 %. Ke depan permintaan baru akan meningkat akibat penggunaan kendaraan listrik dan kompor listrik yang diakselerasi oleh program pemerintah.



Gambar 4.12 Konsumsi Listrik Indonesia

*) Kuartal III 2021

Sumber: KESDM (2021) dalam Dihni & Mutia (2021)

Pengembangan energi laut telah berhasil dilakukan oleh PLTGL dan mampu bekerja secara teknis. PLTGL yang telah berhasil dikembangkan antara lain PLTA bersumber energi gelombang laut, PLTGL OWC, dan PLTAGL atau Pembangkit Listrik Tenaga Arus dan Gelombang Laut. Ketiganya telah mampu bekerja secara teknis untuk menghasilkan energi. Apa bila berhasil dikembangkan lebih lanjut dan beroperasi dengan baik, PLTGL mampu menjadi salah satu alternatif sumber energi.

Ir. Aris Subarkah, M.Si menuturkan bahwa energi gelombang laut merupakan salah satu alternatif dalam menghadirkan energi bersih karena gelombang sebagai pembangkit energi listrik selalu terbarukan terus

menerus dan tidak menimbulkan masalah lingkungan yang berarti seperti pencemaran lingkungan. Beliau berpendapat pemanfaatan energi gelombang laut di Indonesia layak untuk diterapkan. Kendalanya memang pemanfaatan energi gelombang menjadi energi listrik memerlukan biaya yang sangat mahal.

Dr. Nono Suprayetno mengatakan bahwa selain sebagai sumber energi untuk memenuhi kebutuhan yang terus meningkat, energi gelombang laut juga merupakan energi bersih yang akan mendukung jalannya transisi energi di Indonesia. Sesuai NDC, target penurunan emisi tahun 2030 pada sektor energi mencapai 314 juta ton CO₂e dengan upaya sendiri dan 446 juta ton CO₂e dengan bantuan internasional. Hingga akhir tahun 2021, realisasi mitigasi mencapai 69,5 juta ton CO₂e di mana angka ini sudah melebihi angka target sebesar 67 juta ton CO₂e. Kendati demikian, saat ini KESDM masih menyusun peta jalan transisi energi menuju karbon netral dengan target sebagai berikut:

- a. 2021 – 2025: penurunan emisi 198 juta ton CO₂e
- b. 2026 – 2030: penurunan emisi 314 juta ton CO₂e
- c. 2031 – 2035: penurunan emisi 475 juta ton CO₂e
- d. 2036 – 2040: penurunan emisi 796 juta ton CO₂e
- e. 2041 – 2050: penurunan emisi 956 juta ton CO₂e
- f. 2051 – 2060: penurunan emisi 1.526 juta ton CO₂e

KESDM berkomitmen dalam pencegahan perubahan iklim dunia dan memiliki target EBT sebesar 23% di tahun 2025, untuk mencapai target tersebut potensi EBT di Indonesia harus dimanfaatkan secara optimal, termasuk memanfaatkan energi laut, sebagai pembangkit listrik. Dalam Peraturan Menteri ESDM No. 50 Tahun 2017 disebutkan bahwa Pembangkit Listrik yang memanfaatkan Tenaga Gerakan dan Perbedaan Suhu Lapisan Laut adalah arus laut, gelombang laut, pasang surut laut (*tidal*), atau perbedaan suhu lapisan laut (*ocean thermal energy conversion/ OTEC*). Pada RUPTL 2021 – 2030, pengembangan Pembangkit EBT yang direncanakan termasuk pembangkit listrik tenaga air laut.

Adanya PLTGL nantinya bukan hanya berperan sebagai suplai energi yang terus meningkat, melainkan juga pendukung transisi energi menuju energi bersih. Energi gelombang laut yang merupakan energi terbarukan akan meningkatkan bauran EBT. Dalam transisi energi, KESDM menyebutkan bahwa terdapat 3 kunci penting yang diperlukan untuk menuju target EBT, NDC dan *Net Zero Emission* (NZE) yaitu:

- a. Akselerasi pengembangan EBT di mana Indonesia memiliki peluang yang sangat besar untuk mengembangkan potensi EBT sebesar 3.686 GW mengingat hingga saat ini pemanfaatan EBT baru mencapai 10.889 MW.
- b. *Phasing out* PLTU yaitu pemberhentian operasi PLTU mengurangi emisi Gas Rumah Kaca dan menciptakan tambahan *demand* untuk EBT.
- c. Percepatan kendaraan listrik yang didorong oleh konsumsi BBM sektor transportasi yang terus meningkat dan produksi minyak yang terus menurun di mana berdampak pada peningkatan impor dan defisit neraca perdagangan.

4.3.2 Kendala Pengembangan PLTGL

Energi gelombang laut merupakan salah satu alternatif energi bersih dengan potensial yang cukup besar. Direktorat Aneka EBT KESDM melalui Dr. Nono Suprayetno mengatakan bahwa potensi energi gelombang laut ada, namun ada beberapa hal yang perlu mendapatkan perhatian khusus. Salah satunya adalah belum adanya teknologi konversi yang matang. Pada umumnya, teknologi konversi energi gelombang laut dikembangkan di Eropa Barat dan Amerika Utara yang memiliki kondisi hidro-oseanografi dan morfologi dasar laut yang sangat berbeda dengan di Indonesia. Hal yang kedua adalah aspek keekonomian, dengan belum matangnya dan belum adanya teknologi konversi energi laut secara komersial maka harga energi dari konversi energi gelombang laut masih belum cukup kompetitif dibandingkan teknologi energi bersih lain misalnya energi surya, hidro, bayu

ataupun panas bumi. Diharapkan dengan perkembangan teknologi konversi ke depan yang semakin maju maka harga energi dari teknologi laut akan makin kompetitif dan dapat dijadikan alternatif dalam penyediaan energi bersih.

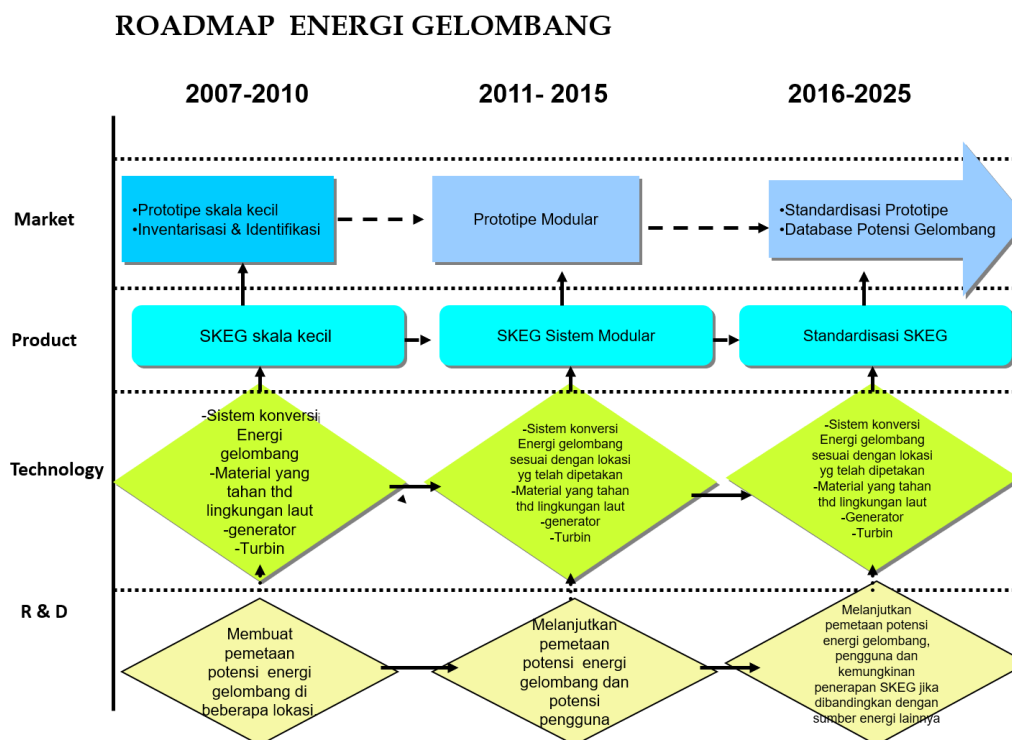
Narasumber lain dalam penelitian ini mengatakan bahwa teknologi konversi energi laut belum cukup *proven*. Dengan belum matangnya dan belum adanya teknologi konversi energi laut secara komersial maka harga energi dari konversi energi gelombang laut masih belum cukup kompetitif dibandingkan teknologi energi bersih lain misalnya energi surya, hidro, bayu ataupun panas bumi. Hal lain yang menyebabkan belum optimalnya perkembangan PLTGL di Indonesia adalah karena belum banyaknya ahli yang mendalami pembangkit ini.

Energi gelombang laut merupakan energi terbarukan sehingga memiliki sifat yang sama dengan energi terbarukan lain yang bersumber dari alam yakni sifat *intermittent*. Energi yang dihasilkan bergantung pada kondisi alam yang terjadi khususnya gelombang. Di Perairan Selatan Jawa sendiri, variabilitas gelombang bergantung pada musim yang terjadi. Gelombang tinggi terjadi pada saat musim timur, sedangkan pada musim barat terjadi sebaliknya.

Pengembangan teknologi konversi energi gelombang laut juga dihadapkan dengan kondisi alam yang sulit dan keterbatasan anggaran dalam pengembangannya. Kondisi wilayah instalasi yang berada di laut memiliki tingkat kesulitan yang tinggi sehingga baik pemasangan dan pemeliharaan membutuhkan biaya tinggi.

Keterbatasan anggaran yang ada juga menjadikan pengembangan teknologi konversi energi gelombang laut belum menjadi prioritas dibanding jenis energi terbarukan lainnya yang lebih matang. Berdasarkan keterangan narasumber Ir. Aris Subarkah, M.T, Pengembangan PLTGL sendiri sebenarnya sudah memiliki peta jalan yang sudah jelas (Gambar 4.13), namun adanya keterbatasan anggaran menjadikan pengembangan berhenti. Hal ini menjadi masalah yang berputar di mana anggaran belum

diprioritaskan untuk teknologi konversi energi gelombang laut yang belum matang dan teknologi energi gelombang laut belum bisa maksimal karena butuh biaya untuk pengembangannya.



Gambar 4.13 Peta Jalan Pengembangan PLTGL

Sumber: Subarkah (2021)

4.3.3 Upaya pengembangan PLTGL

Energi gelombang laut yang merupakan energi terbarukan bersumber dari dinamika alam di laut memiliki potensi lokal yang kaya di Indonesia. Narasumber berpendapat bahwa dengan laut yang begitu luas dan garis pantai yang sangat panjang, Indonesia memiliki potensi energi laut yang sangat besar mulai dari arus, angin, pasang surut, perbedaan temperatur, dan gelombang laut. Di sisi lain, permintaan terhadap energi juga terus meningkat sehingga potensi tersebut akan sangat baik apabila dapat dimanfaatkan. Pemanfaatan energi gelombang laut juga bisa dikombinasikan dengan teknologi lain misalnya pemecah gelombang.

Pemanfaatan PLTGL di Indonesia belum semaju pemanfaatan energi terbarukan lainnya. Pengembangan PLTGL sejauh ini masih sebatas pada tahap riset dan penelitian dan belum sampai pada tahap pemanfaatan secara komersial. Salah satu alasan dari hal tersebut adalah belum adanya teknologi yang cukup terbukti untuk dapat memanfaatkan potensi energi gelombang yang ada.

Penelitian dan pengembangan PLTGL yang telah dilakukan oleh BPPT sudah sampai pada tahap uji coba pemanfaatan PLTGL. Pengembangan PLTGL diawali dengan kajian potensi sumber daya. Ketersediaan potensi energi gelombang yang telah didapat melalui kajian sumber daya kemudian dimanfaatkan melalui teknologi konversi energi. Setidaknya ada dua jenis teknologi konversi energi yang telah dikembangkan oleh BPPT BRIN, yakni PLTA bersumber energi gelombang laut, PLTGL OWC, dan PLTAGL atau Pembangkit Listrik Tenaga Arus dan Gelombang Laut.

Teknologi PLTGL yang telah dikembangkan oleh narasumber Ir. Andri Subandriya, M.Si adalah PLTA bersumber energi gelombang laut. Skema konversi energi pada teknologi ini adalah mengubah energi potensial gelombang menjadi energi kinetik untuk memutar turbin yang kemudian menghasilkan energi listrik. Gelombang laut memompa masa air naik, lalu air mengalir ke reservoir setinggi 4 meter. Air tersebut kemudian mengalir ke bawah karena adanya gravitasi, lalu mendorong turbin yang terhubung dengan generator seperti teknologi PLTA pada umumnya.

PLTA berbasis energi gelombang laut ini memiliki teknologi dengan PLTA. Karena kesamaan tersebut, untuk kinerja dan perawatan alat cenderung sama dengan kebanyakan teknologi PLTA yang telah terbukti bekerja. Hal yang membedakan kedua pembangkit ini hanyalah sumber energinya di mana PLTA yang dikembangkan oleh BPPT ini memanfaatkan gelombang laut untuk memindahkan masa air.

Pengembangan teknologi pembangkit yang dikembangkan oleh tim Ir. Andri Subandriya, M.Si tersebut diuntungkan dengan karakteristik

topografi pantai di lokasi (Yogyakarta) yang berbentuk corong secara alami, sehingga tidak perlu dibutuhkan banyak pekerjaan sipil. Ada pun pekerjaan sipil yang diperlukan dalam pengembangan pembangkit tersebut adalah pada modifikasi wilayah untuk dijadikan reservoir. Karakter batuan di wilayah tersebut berjenis *kars* yang didominasi oleh kapur sehingga butuh modifikasi agar air dapat ditampung dengan maksimal sebelum dialirkan untuk memutar turbin. Karenanya, narasumber juga menyampaikan bahwa dalam pengembangan pembangkit jenis ini biaya yang dikeluarkan juga menyesuaikan dengan daya dukung lingkungan seperti topografi pantai dan jenis batuan.

Pemanfaatan PLTGL sebagai pendukung ketahanan energi di Indonesia belum menjadi prioritas. Hal tersebut kembali lagi kepada kematangan teknologi PLTGL yang belum mencapai keekonomian yang baik. Berdasarkan keterangan narasumber, untuk mencapai transisi energi yang cepat, teknologi yang sudah siap lebih diprioritaskan seperti panas bumi dan solar PV.

4.4 Hasil Analisis Data

Data yang telah diolah dan disajikan pada subbab sebelumnya akan dianalisis lebih jauh dalam sub bab ini. Dalam subbab ini dilakukan dua analisis, yakni analisis potensi energi gelombang laut di Perairan Selatan Pulau Jawa dan analisis pemanfaatan PLTGL. Analisis potensi dilakukan dengan analisis matematis sederhana yang telah didapat dari hasil-hasil pada subbab sebelumnya, sedangkan analisis pemanfaatan PLTGL dilakukan melalui analisis SWOT.

4.4.1 Potensi Pemanfaatan PLTGL

4.4.1.1 Faktor Internal

Berdasarkan informasi dari data yang dikumpulkan melalui wawancara, telaah dokumen, dan kalkulasi peneliti terdapat dua aspek internal yang menjadi potensi pemanfaatan PLTGL sebagai berikut:

a. Potensi Sumber Daya Energi

Perairan Selatan Pulau Jawa memiliki potensi sumber daya energi gelombang laut yang besar. Hal tersebut menjadi modal utama dalam implementasi pemanfaatan PLTGL nantinya. Kalkulasi secara matematis juga dilakukan untuk mengukur potensi gelombang. Hasil kalkulasi menunjukkan potensi spasial energi gelombang laut di Perairan Selatan Pulau Jawa sekitar 20 – 35 kW/m. Kalkulasi lebih lanjut juga dilakukan menggunakan tiga jenis alat di lima lokasi potensial. Kombinasi yang menghasilkan energi paling besar adalah penggunaan konverter energi gelombang jenis *Terminator* di lokasi 3 (Tasikmalaya) yang menghasilkan daya rata-rata hingga 827 kW.

b. Sumber Energi Bersih

PLTGL juga memiliki keunggulan tidak mengeluarkan emisi, sehingga berdampak baik bagi lingkungan. Energi gelombang laut adalah alternatif untuk menghadirkan energi bersih. Gelombang laut sebagai sumber pembangkitan listrik selalu ada terus-menerus, terbarukan, dan tidak menyebabkan masalah lingkungan yang signifikan. Energi gelombang laut juga mendukung transisi energi di Indonesia. Untuk mencapai tujuan EBT sebesar 23% pada tahun 2025, potensi EBT di Indonesia harus digunakan secara optimal, termasuk penggunaan energi laut, sebagai pembangkit listrik.

4.4.1.2 Faktor Eksternal

Ada tiga faktor eksternal yang menjadi peluang bagi pemanfaatan PLTGL. Adapun faktor-faktor tersebut adalah sebagai berikut:

a. Kebutuhan Energi Terus Meningkat

Kebutuhan energi yang terus meningkat serta penambahan jumlah penduduk tentunya membutuhkan sumber energi dan memberi peluang bagi energi terbarukan seperti PLTGL.

b. Phasing Out Pembangkit Fosil

Energi gelombang laut yang merupakan energi terbarukan yang akan meningkatkan bauran EBT. *Phasing out* PLTU yaitu pemberhentian operasi PLTU segera dilakukan. Langkah ini ditujukan untuk mengurangi emisi Gas Rumah Kaca dan menciptakan tambahan *demand* untuk EBT. *Demand* ini akan memberikan peluang bagi PLTGL untuk menjadi alternatif pemenuhan kebutuhan energi.

c. Kombinasi dengan Infrastruktur Laut dan Pesisir

Pembangunan PLTGL juga dapat dipadukan dengan pekerjaan sipil lainnya yang ada di laut dan pesisir. Hal ini dapat memberikan keuntungan lebih dalam proses pembangunannya dan menghemat biaya yang dikeluarkan. Infrastruktur yang dapat dipadukan dengan PLTGL antara lain pemecah ombak atau *Tsunami Early Warning System* (TEWS).

4.4.2 Kendala Pengembangan PLTGL**4.4.2.1 Faktor Internal**

Berdasarkan informasi dari data yang dikumpulkan melalui wawancara, telaah dokumen, dan kalkulasi peneliti terdapat dua aspek internal yang menjadi kendala pemanfaatan PLTGL sebagai berikut:

a. Teknologi Belum Matang

Salah satu yang menjadi kekurangan PLTGL adalah keterbatasan teknologi yang sampai saat ini belum cukup terbukti menghasilkan energi secara maksimal. Teknologi-teknologi PLTGL yang tersedia umumnya belum bisa menghasilkan energi seefisien pembangkit terbarukan lainnya seperti solar dan hidro. Selain itu, teknologi yang telah berhasil dikembangkan di negara-negara lain pun memiliki karakteristik yang tidak sesuai dengan kondisi Perairan Selatan Pulau Jawa. Teknologi konversi energi gelombang laut dikembangkan di wilayah yang memiliki kondisi

hidro-oseanografi dan morfologi dasar laut yang sangat berbeda dengan di Indonesia. Hal ini juga dibuktikan dengan kalkulasi yang dilakukan pada subbab sebelumnya di mana dari beberapa skenario yang dilakukan menghasilkan nilai *capacity factor* terbesar hanya mencapai 11,82 %.

b. Biaya Pengembangan yang Mahal

Biaya yang dibutuhkan untuk mengembangkan PLTGL juga cukup tinggi. Pengoperasian perangkat apa pun di lingkungan laut cenderung lebih rumit dalam implementasinya daripada perangkat berbasis darat. Dalam kasus PLTGL, alat berinteraksi langsung dengan ombak, tantangannya bahkan terasa lebih. Selain itu, perangkat yang kuat juga diperlukan untuk menangani kondisi yang dapat menyebabkan perawatan yang sulit dan mahal untuk menghasilkan biaya yang lebih mahal.

4.4.2.2 Faktor Eksternal

Ada dua faktor eksternal yang menjadi hambatan bagi pemanfaatan PLTGL, yakni:

a. Keterbatasan Anggaran

Keterbatasan anggaran menjadi hambatan dalam pengembangan PLTGL. Keterbatasan tersebut kemudian menjadikan teknologi PLTGL sulit berkembang sehingga semakin tertinggal dibanding jenis pembangkit energi terbarukan lainnya. Hal ini menjadi masalah yang berputar di mana anggaran belum diprioritaskan untuk teknologi konversi energi gelombang laut yang belum matang dan teknologi energi gelombang laut belum bisa maksimal karena butuh biaya untuk pengembangannya. Karenanya juga dibutuhkan penelitian lanjutan untuk menghadirkan teknologi yang lebih efektif dan efisien dalam memanen energi gelombang atau untuk mengembangkan teknologi yang sudah ada agar lebih maksimal.

b. Hambatan Alam

Sama halnya pembangkit energi terbarukan lainnya, energi yang dihasilkan PLTGL bergantung pada keadaan di alam (gelombang laut). Hal tersebut menjadikan PLTGL bersifat *intermittent*. Selain itu, keberadaan PLTGL di tengah laut juga memberikan kesulitan tersendiri baik dalam hal pemasangan, pengawasan, ataupun pemeliharaan.

c. Kurangnya Tenaga Ahli

Tenaga ahli yang dapat mengembangkan teknologi PLTGL belum banyak. Pada pengembangan PLTGL, dibutuhkan banyak ahli dari banyak cabang ilmu. Keilmuan tersebut diperlukan dalam tahapan-tahapan pengembangan PLTGL, misalnya kajian sumber energi, survey hidrooseanografi, survey geoteknik, desain PLTGL meliputi struktur, turbin, dan lainnya.

4.4.3 Upaya Pengembangan PLTGL

Berdasarkan hasil pengumpulan dan pengolahan data yang telah dilakukan mengenai pemanfaatan PLTGL dalam mendukung ketahanan energi di Indonesia, peneliti melakukan analisis SWOT. Analisis dilakukan dengan memetakan potensi internal (kekuatan dan kelemahan) serta potensi eksternal (peluang dan tantangan) PLTGL untuk mendukung ketahanan energi. menunjukkan analisis SWOT yang dilakukan dengan memetakan kekuatan (S), kelemahan (W), peluang (O), dan Tantangan (T) yang dihadapi PLTGL dalam mendukung ketahanan energi.

Salah satu yang menjadi keunggulan PLTGL di Indonesia adalah potensi sumber daya tersedia melimpah. Selain itu, Pembangkitan energi menggunakan PLTGL ini juga memiliki kelebihan dari tidak adanya emisi yang dihasilkan sehingga akan berdampak baik pada lingkungan. Sedangkan, kekurangan PLTGL dari sisi internal adalah keterbatasan teknologi yang sampai saat ini belum cukup terbukti menghasilkan energi

secara maksimal. Selain itu, biaya yang dibutuhkan untuk mengembangkan PLTGL juga cukup tinggi.

Dari sisi eksternal, keterbatasan anggaran menjadi hambatan dalam pengembangan PLTGL. Keterbatasan tersebut kemudian menjadikan teknologi PLTGL sulit berkembang sehingga semakin tertinggal dibanding jenis pembangkit energi terbarukan lainnya. Namun program pemerintah ke depan yang akan meninggalkan pembangkit fosil memberikan peluang bagi energi terbarukan seperti PLTGL untuk menggantikan peran yang selama ini diemban oleh pembangkit fosil. Selain itu, terus meningkatnya permintaan energi seiring bertambahnya populasi tentunya memerlukan sumber energi terbarukan seperti PLTGL. Pembangunan PLTGL juga dapat dikombinasikan dengan konstruksi sipil lainnya seperti pemecah gelombang sehingga dalam satu pembangunan didapat manfaat yang lebih.

Tabel 4.6 Strategi Analisis SWOT Pengembangan Energi Gelombang Laut

	<p>Kekuatan (Strength)</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Memiliki potensi sumber daya yang cukup besar 2. Merupakan energi bersih dan terbarukan 	<p>Weakness (Kelemahan)</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Teknologi yang tersedia belum cukup terbukti 2. Biaya yang diperlukan untuk pengembangan masih terbilang mahal
<p>Peluang (Opportunity)</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Permintaan energi meningkat 2. Pembangkit bertenaga fosil akan segera ditinggalkan 3. Kombinasi teknologi dengan infrastruktur laut 	<p>Strategi SO</p> <p>Mengembangkan PLTGL sebagai sumber energi bersih (S1, S2, O1, O2)</p> <ol style="list-style-type: none"> a. Melakukan evaluasi Pengembangan PLTGL yang telah dilakukan b. Menyusun peta jalan dan perencanaan pengembangan PLTGL c. Merealisasikan pengembangan PLTGL yang telah direncanakan 	<p>Strategi WO</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Mengembangkan teknologi PLTGL yang lebih efisien sesuai karakteristik Perairan Selatan Pulau Jawa. (W1, O1, O2) 2. Mengombinasikan teknologi konversi energi gelombang dengan Infrastruktur pantai lain agar lebih menekan biaya (W2, O3)
<p>Tantangan (Threats)</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Keterbatasan anggaran 2. Hambatan alam 3. Kurangnya tenaga ahli 	<p>Strategi ST</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Menyediakan skema pembiayaan energi bersih (S2, T1) 2. Bekerja sama dengan pihak-pihak terkait dalam hal pembiayaan dan <i>transfer knowledge</i> dari negara-negara yang telah berhasil mengembangkan energi gelombang laut (S1, T1, T3) 	<p>Strategi WT</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Menambah anggaran untuk mengembangkan teknologi PLTGL (W1, T1) 2. Mengembangkan teknologi penyimpanan energi untuk mengatasi <i>intermittent</i> (W2, T2) 3. Melakukan instalasi dan pemeliharaan di saat gelombang tenang sehingga tidak menyulitkan (W2, T2)

Sumber: Diolah oleh Peneliti (2022)

Pengembangan energi gelombang laut di Indonesia memiliki potensi dan prospek yang cukup besar sehingga perlu dimanfaatkan. Kendati demikian, pengembangan PLTGL masih memiliki beberapa kendala. Karenanya, perlu adanya strategi yang tepat dalam mengembangkan PLTGL di Indonesia. Dalam penelitian ini, peneliti menyusun strategi yang dibangun berdasarkan pemetaan SWOT yang telah dilakukan. Strategi SWOT dirumuskan pada Tabel 4.6 Strategi Analisis SWOT Pengembangan Energi Gelombang Laut.

Strategi SO dirumuskan berdasarkan kekuatan dan peluang yang dapat meningkatkan potensi pengembangan pembangkit listrik tenaga gelombang laut. Rumusan SO disusun dari jawaban narasumber penelitian, dan dokumen pendukung sehingga menghasilkan strategi sebagai untuk memanfaatkan energi gelombang laut sebagai pembangkit listrik secara maksimal dengan beberapa cara sebagai berikut:

a. Melakukan evaluasi Pengembangan PLTGL yang telah dilakukan

Pengembangan pembangkit listrik telah dilakukan sebelumnya oleh BPPT BRIN. Ada tiga jenis pembangkit yang telah berhasil dikembangkan yakni PLTA energi gelombang, PLTGL OWC, PLTAGL. Beberapa evaluasi perlu dilakukan berdasarkan pengembangan yang telah dilakukan. Salah satunya melakukan pengembangan lanjutan untuk PLTGL di lepas pantai.

b. Menyusun peta jalan dan perencanaan pengembangan PLTGL

Peta jalan perlu disusun berdasarkan pada evaluasi yang dilakukan. Sampai saat ini, peta jalan pengembangan energi laut di Indonesia masih terbatas di pengembangan pembangkit listrik tenaga arus laut yakni melakukan pengembangan Pembangkit Listrik Tenaga Arus Laut sebesar 13.4 GW

ditargetkan untuk memenuhi *NZE (Net Zero Emission)* pada tahun 2060.

c. Merealisasi dan pengembangan PLTGL

Setelah peta jalan telah disusun, langkah selanjutnya adalah merealisasikan rencana tersebut. Bersamaan dengan realisasi, dilakukan juga evaluasi dan perbaikan rencana agar memberi hasil yang lebih maksimal.

Strategi WO dirumuskan untuk mengantisipasi kekurangan atau kelemahan yang ada dari PLTGL berdasarkan peluang yang ada. Strategi WO dirumuskan sebagai berikut:

a. Mengembangkan teknologi PLTGL yang lebih efisien

Teknologi PLTGL perlu dikembangkan lebih matang lagi untuk menghasilkan perangkat yang mampu bekerja secara optimum. Berkaitan dengan pengembangan yang dilakukan, kesesuaian teknologi dengan karakteristik gelombang laut di Indonesia khususnya perairan Selatan Jawa perlu dilakukan. Hal ini agar menciptakan kombinasi sesuai antara teknologi dan kondisi alam sehingga menghasilkan energi yang lebih besar.

b. Mengombinasikan teknologi konversi energi gelombang dengan Infrastruktur pantai lain agar lebih menekan biaya

PLTGL juga memiliki peluang untuk dikembangkan bersama dengan infrastruktur lain agar menghemat biaya dengan fungsi yang lebih. Salah satu contoh yang telah banyak dikembangkan adalah dengan pemecah gelombang. Infrastruktur lain yang dapat dipadukan dengan PLTGL adalah Buoy untuk keperluan *Tsunami Early Warning System (TEWS)*.

Strategi ST diupayakan untuk meningkatkan potensi energi gelombang yang ada serta mengantisipasi ancaman yang dapat

menghambat pengembangan PLTGL. Karenanya, dirumuskan strategi ST sebagai berikut:

a. **Menyediakan skema pembiayaan energi bersih**

Energi gelombang laut merupakan energi terbarukan yang ramah lingkungan. Sama seperti energi terbarukan lain, skema pembiayaan khusus diperlukan untuk memaksimalkan manfaat intangible yang ada padanya. Skema perdagangan karbon juga dapat menjadi alternatif biaya tambahan untuk pembiayaan energi gelombang laut.

b. **Bekerja sama dengan pihak-pihak terkait dalam hal pembiayaan dan transfer knowledge dari negara-negara yang telah berhasil mengembangkan energi gelombang laut.**

Kerja sama dengan pihak-pihak terkait baik dari nasional ataupun internasional perlu dilakukan. Kerja sama ini tidak hanya terbatas di pembiayaan tapi juga pengembangan PLTGL sendiri. Salah satu yang menjadi nilai jual pengembangan PLTGL Indonesia adalah potensi besar yang dimiliki berdasar pada kalkulasi-kalkulasi yang telah dilakukan.

Strategi WT dirancang untuk mengatasi kekurangan yang ada dalam pengembangan PLTGL sebagai alternatif energi terbarukan juga untuk mengatasi hambatan yang ada. Berikut rumusan strategi WT:

a. **Menambah anggaran untuk mengembangkan teknologi PLTGL**

Anggaran untuk pengembangan PLTGL diperlukan untuk menghentikan kondisi *deadlock* yang ada. Dengan adanya anggaran, pengembangan dapat dilakukan lebih maksimal dan segera memberi dampak yang positif bagi penyediaan energi yang bersumber dari gelombang laut sekaligus akan memperkuat ketahanan energi.

b. Melakukan instalasi di saat gelombang tenang sehingga tidak menyulitkan

Penelitian mengenai karakteristik gelombang laut dapat dipelajari berdasar analisis deret waktu. Analisis tersebut dapat menjadi modal perencanaan untuk melakukan instalasi ataupun pemeliharaan PLTGL. Analisis spasial juga diperlukan untuk memberikan gambaran wilayah instalasi sehingga dapat menjadi acuan dalam melakukan penyesuaian dalam pengembangan PLTGL.

Dari beberapa strategi tersebut, dilakukan pengerucutan untuk menentukan strategi utama. Pengerucutan dilakukan menggunakan metode *Quantitative Strategic Planning Matrix* (QSPM). QSPM diawali oleh SWOT yang sudah dilakukan, lalu penentuan bobot, dan penilaian skor kemenarikan, dan perhitungan skor kemenarikan total (SKT).

Pembobotan dilakukan dengan menelaah pendapat para narasumber mengenai pengaruh setiap faktor (baik *strength*, *weakness*, *opportunity*, atau *threats*) terhadap pemanfaatan PLTGL (Lampiran 3). Hasil pembobotan yang telah dilakukan digunakan untuk melakukan penilaian skor kemenarikan (SK) yang merupakan ukuran seberapa berpengaruhnya faktor terhadap strategi yang diusulkan. Lalu, dilakukan perhitungan skor kemenarikan total dengan mengalikan nilai SK dan bobot setiap faktor. Strategi dengan nilai tertinggi kemudian ditarik menjadi strategi utama. Analisis QSPM (Lampiran 4) yang telah dilakukan menunjukkan strategi 3 mendapat nilai SKT tertinggi dengan skor 10,6. Berdasarkan QSPM tersebut, strategi utama yang dipilih adalah strategi tiga yakni mengembangkan teknologi PLTGL yang lebih efisien sesuai karakteristik Perairan Selatan Pulau Jawa. Ada pun beberapa strategi pendukung yang dapat menguatkan strategi tersebut antara lain:

- a. Melakukan evaluasi Pengembangan PLTGL yang telah dilakukan.
- b. Menyusun peta jalan dan perencanaan pengembangan PLTGL.

- c. Merealisasikan pengembangan PLTGL yang telah direncanakan.
- d. Bekerja sama dengan pihak-pihak terkait dalam hal pembiayaan dan *transfer knowledge* dari negara-negara yang telah berhasil mengembangkan energi gelombang laut.

4.5 Interpretasi Data

Perairan Selatan Pulau Jawa memiliki energi gelombang laut yang cukup potensial. Hal ini didasarkan pada hasil penelitian yang didapat. Berdasarkan diskusi dengan narasumber terkait, kalkulasi peneliti, dan penelitian terdahulu Perairan Selatan Pulau Jawa memiliki potensi yang cukup tinggi. Hal ini dikarenakan gelombang laut di Perairan Selatan Pulau Jawa memiliki gelombang yang cukup tinggi dan gelombang tinggi menyimpan energi mekanik yang besar.

Perhitungan fluks energi gelombang laut yang dilakukan menunjukkan bahwa Perairan Selatan Pulau Jawa memiliki potensi spasial energi gelombang sekitar 20 – 35 kW/m. Hal ini menunjukkan bahwa gelombang laut di perairan selatan Pulau Jawa berpotensi untuk dimanfaatkan sebagai sumber energi. Kalkulasi kemudian dilanjutkan dengan mengombinasikan penggunaan tiga jenis konverter energi gelombang di lokasi-lokasi potensial. Hasil kalkulasi menunjukkan bahwa dengan penggunaan konverter daya gelombang Terminator, Perairan Selatan Pulau Jawa dapat menghasilkan rata-rata hingga 827 kW. Daya yang dihasilkan cukup besar, namun faktor kapasitas yang dihasilkan hanya sebesar 11,82 %. Hal ini karena teknologi yang digunakan dalam skenario adalah teknologi yang dikembangkan di wilayah yang memiliki karakteristik perairan berbeda dengan Perairan Selatan Pulau Jawa.

Berkaitan dengan posisi PLTGL dalam mendukung transisi energi, kekayaan potensi energi gelombang laut di Indonesia dan tidak adanya emisi yang dihasilkan menjadi kelebihan PLTGL dalam mendukung transisi energi bersih. Ditambah dari sisi eksternal, PLTGL memiliki peluang untuk menggantikan peran pembangkit fosil dalam menyuplai kebutuhan energi

yang juga terus meningkat. Energi gelombang laut dapat menjadi salah satu alternatif dalam menghadirkan energi bersih karena gelombang sebagai pembangkit energi listrik selalu terbarukan terus menerus dan tidak menimbulkan masalah lingkungan yang berarti seperti tidak terjadi pencemaran lingkungan. Beliau berpendapat pemanfaatan energi gelombang laut di Indonesia layak untuk diterapkan. Kendalanya memang pemanfaatan energi gelombang menjadi energi listrik memerlukan biaya yang sangat mahal. Selain sebagai sumber energi untuk memenuhi kebutuhan yang terus meningkat, energi gelombang laut juga merupakan energi bersih yang akan mendukung jalannya transisi energi di Indonesia.

Kendati memiliki potensi yang melimpah, Pemanfaatan PLTGL di Indonesia belum semaju pemanfaatan energi terbarukan lainnya. Pengembangan PLTGL sejauh ini masih sebatas pada tahap riset dan penelitian dan belum sampai pada tahap pemanfaatan secara komersial. Pengembangan PLTGL masih memiliki beberapa kendala dan hambatan. PLTGL memiliki kekurangan dari sisi teknologi dan keekonomiannya. Teknologi PLTGL yang tersedia sampai saat ini belum ada yang menunjukkan hasil yang cukup baik dalam mengubah kandungan energi pada gelombang laut menjadi energi listrik. Selain itu, kesulitan dalam pengembangan PLTGL tersebut menjadikan biaya pengembangannya cukup mahal dan berdampak pada keekonomiannya. Keterbatasan anggaran juga menjadi salah satu hambatan dalam pengembangan PLTGL karena harus diprioritaskan pada pembangkit yang sudah lebih matang.

4.6 Pembahasan

4.6.1 Potensi Pemanfaatan PLTGL

Perairan Selatan Pulau Jawa memiliki gelombang yang cukup tinggi. Hal ini dikarenakan posisi geografisnya yang berhadapan langsung dengan Samudera Hindia menjadikan *fetch* yang tersedia semakin luas. *Fetch* yang luas memberikan keleluasaan pada angin dalam bergerak tanpa hambatan

sehingga memberikan dorongan pada muka air laut yang kemudian menghasilkan gelombang yang tinggi.

Gelombang laut yang tinggi menyimpan energi mekanik yang besar. Kalkulasi yang dilakukan peneliti menunjukkan bahwa potensi spasial energi gelombang sekitar 20 – 35 kW/m. Dengan lokasi yang paling potensial adalah lokasi 3 di selatan Tasikmalaya karena memiliki potensi energi yang besar, dekat dengan daratan dan gardu induk, dan kedalaman yang sesuai. Dengan penggunaan konverter energi gelombang jenis Terminator misalnya, lokasi tersebut mampu menghasilkan daya rata-rata hingga 827 kW. Namun, nilai tersebut belum cukup maksimal karena faktor kapasitas yang didapat hanya sebesar 11.82 %. Hal ini karena teknologi yang digunakan memang tidak sesuai dengan karakteristik Perairan Selatan Pulau Jawa, karenanya dibutuhkan pengembangan secara spesifik teknologi PLTGL yang bekerja secara optimal di wilayah Perairan Selatan Pulau Jawa.

Berdasarkan keterangan para narasumber, pemilihan jenis teknologi harus disesuaikan dengan kondisi alam di Perairan Selatan Pulau Jawa. Dua jenis PLTGL yang dikembangkan oleh BPPT merupakan teknologi yang beroperasi di pesisir. Hal itu ditujukan untuk mempermudah proses pengembangan yang pada saat itu merupakan tahapan awal. Ir. Aris Subarkah, M.T mengatakan bahwa untuk memanen energi yang lebih besar PLTGL bisa diletakkan dan beroperasi di tengah laut. Tahapan itu sebenarnya sudah dimulai dengan menyiapkan modul-modul PLTGL yang disiapkan untuk mempermudah instalasi di laut, namun karena adanya keterbatasan anggaran tahapan tersebut terhenti dan modul-modul tersebut masih berada di daratan.

Perlu adanya teknologi konverter energi gelombang yang karakteristiknya sesuai dengan gelombang laut di Perairan Selatan Pulau Jawa. Berdasarkan keterangan narasumber, ada banyak jenis teknologi PLTGL yang tersedia, semuanya memiliki kelebihan dan kekurangan masing-masing, sehingga perlu kajian lebih mendalam untuk menentukan

kecocokannya dengan karakter gelombang Perairan Selatan Pulau Jawa. Namun. Berdasarkan kalkulasi yang dilakukan menggunakan tiga jenis pembangkit (Point absorber, attenuator, dan Terminator), konverter energi gelombang tipe Terminator menghasilkan nilai energi dan faktor kapasitas yang lebih tinggi. Informasi tersebut dapat menjadi acuan dalam pengembangan PLTGL di Perairan Pulau Selatan Pulau Jawa. Sebagai acuan, Perairan Pulau Selatan Pulau Jawa memiliki karakter gelombang yang didominasi oleh kombinasi tinggi gelombang signifikan 1,5 – 2 meter dengan periode 14 – 15 detik. Karenanya, dibutuhkan desain konverter energi gelombang yang bekerja maksimal pada gelombang dengan karakteristik tersebut.

Secara garis besar sebagai negara maritim dengan laut yang luas dan garis pantai yang sangat panjang Indonesia memiliki potensi energi laut yang besar. Salah satu energi laut yang potensial adalah energi gelombang laut terutama di wilayah perairan laut yang berhadapan dengan samudera. Energi gelombang laut juga merupakan energi yang rendah emisi sehingga ramah lingkungan.

Strategi yang ditempuh dalam transisi energi mencakup sisi suplai dan sisi demand. Dalam sisi suplai didorong pengembangan EBT dalam sektor pembangkitan, retirement/phasing out PLTU, implementasi PLTS Atap, konversi PLTD ke pembangkit EBT, pemanfaatan energi baru seperti hydrogen dan penggunaan sistem baterai. Dalam sektor pembangkitan, Menteri ESDM telah menetapkan RUPTL PT PLN (Persero) tahun 2021-2030 yang merupakan RUPTL paling hijau di mana porsi pembangkit berbasis EBT mencapai 20,9 GW atau sekitar 51,6% untuk memenuhi target EBT 23% tahun 2025 dan target NDC tahun 2030. Pada sisi *demand* yang mencakup sektor rumah tangga, industri, transportasi dan komersial, strategi menuju NZE dititikberatkan pada penghentian impor LPG dan BBM, peningkatan penggunaan kompor listrik dan mobil listrik, pengurangan porsi batu bara dalam industri, penambahan jaringan gas, pemanfaatan biodiesel, peningkatan efisiensi energi, penerapan manajemen energi dan SKEM.

Pengembangan EBT untuk mencapai NZE perlu didukung oleh pengembangan Super Grid untuk peningkatan konektivitas sehingga dapat mengatasi *mismatch* antara sumber ET setempat dan lokasi *demand* besar serta mampu mengurangi dampak *intermittency* pembangkit VRE yang semakin masif.

Pemanfaatan energi gelombang laut di Indonesia telah dilakukan di skala penelitian dan pengembangan. Penelitian dan pengembangan yang telah dilakukan meliputi kajian sumber daya dan konversi energi. Beberapa teknologi yang telah dikembangkan di antaranya adalah PLTGL OWC, PLTA bersumber energi gelombang laut, dan PLTAGL atau Pembangkit Listrik Tenaga Arus dan Gelombang Laut.

Pengembangan PLTGL ini harusnya dapat dikembangkan lebih lanjut mengingat potensi yang ada di lautan Indonesia. Ke depan, permintaan terhadap energi akan terus meningkat dan pembangkit fosil akan ditinggalkan, karenanya dibutuhkan suplai energi terbarukan yang ramah lingkungan seperti PLTGL. Selain itu, PLTGL juga dapat dikombinasikan dengan infrastruktur lain seperti pemecah gelombang sehingga memberikan manfaat yang lebih besar.

4.6.2 Kendala Pengembangan PLTGL

Salah satu kekurangan PLTGL adalah biaya pengembangan yang cukup tinggi. Keterbatasan anggaran juga menjadi salah satu pemicu lain mengapa PLTGL di Indonesia belum banyak berkembang seperti pembangkit lain. Hal ini kemudian menjadi masalah yang berputar di mana PLTGL tidak berkembang karena keterbatasan anggaran, dan anggaran untuk PLTGL menjadi terbatas karena diprioritaskan untuk konversi energi lain yang sudah lebih matang. Keadaan tersebut menjadikan PLTGL tertinggal dari pembangkit lain kendati memiliki potensi yang besar.

Penelitian dan pengembangan perlu dilakukan untuk menghasilkan teknologi PLTGL yang lebih matang dan ekonomis. Namun demikian, untuk mengembangkan teknologi tersebut juga diperlukan biaya yang tidak

mudah, karenanya diperlukan dukungan pemerintah ataupun investasi swasta dalam pengembangannya. Pada PLTGL yang sudah terbukti berhasil memanfaatkan energi gelombang, skema pembiayaan perlu dirancang ulang di masa transisi energi seperti ini untuk merealisasikan komersialisasi energi gelombang laut.

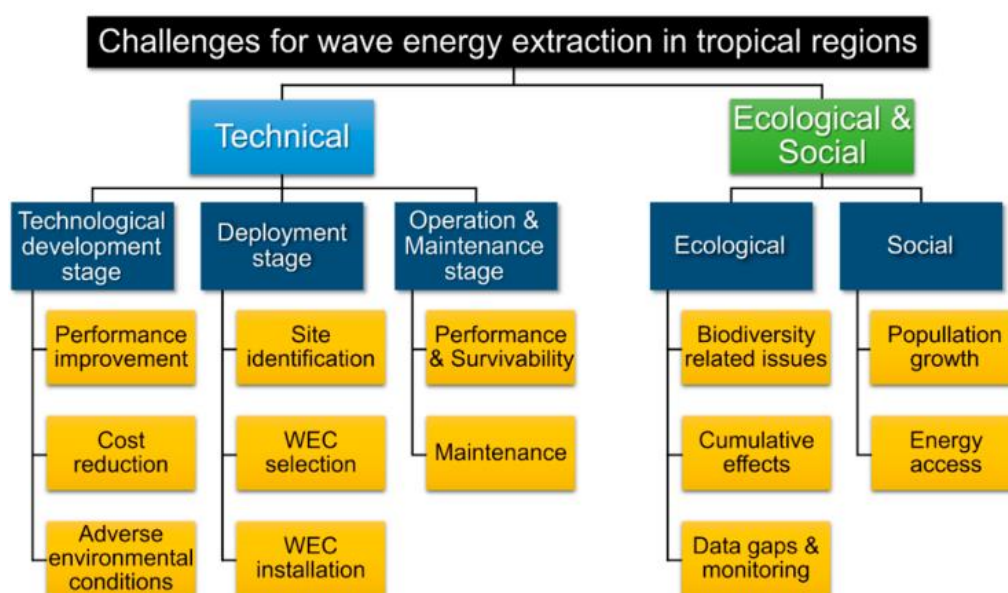
Berkaitan dengan kondisi alam yang ada, penelitian mengenai karakteristik gelombang laut perlu diteliti lebih dalam untuk menyusun strategi kapan waktu pemasangan yang tepat dan penyesuaian-penyesuaian yang dilakukan. Untuk mengatasi sifat *intermittentnya*, perlu juga dilakukan pengembangan penyimpanan energi agar dapat menstabilkan pasokan energi ke pelanggan.

Kendala-kendala dan tantangan pengembangan PLTGL tersebut (sebagaimana informasi dari para narasumber) sesuai dengan yang dinarasikan oleh Felix *et al.* (2019). Felix *et al.* mengelompokkan kendala pengembangan PLTGL di wilayah tropis seperti pada Gambar 4.14. Tantangan untuk ekstraksi energi gelombang dapat dipisahkan menjadi masalah teknis tentang perangkat (termasuk teknologi konverter energi gelombang itu sendiri) dan implementasinya yang berkaitan dengan penempatan, pengoperasian, pemeliharaan, dan pemindahan, serta masalah sosial dan ekologi.

Pengoperasian perangkat apa pun di lingkungan laut lebih rumit implementasinya dibandingkan perangkat yang berbasis di darat. Dalam kasus PLTGL yang berinteraksi langsung dengan ombak, tantangannya bahkan lebih terasa. Di seluruh dunia, upaya difokuskan pada peningkatan kinerja PLTGL dan pengurangan biaya PLTGL. Selain itu, perangkat yang kokoh juga diperlukan untuk menghadapi kondisi yang bisa saja menyebabkan perawatan yang sulit dan mahal sehingga menghasilkan biaya yang lebih mahal.

Ketika nantinya PLTGL berhasil dibangun dan mulai beroperasi, maka tantangan selanjutnya yang akan dihadapi adalah operasional dan pemeliharaan yang berkaitan dengan kinerja dan kemampuan bertahan

PLTGL. PLTGL mungkin dapat mengalami kejadian ekstrem akibat hantaman gelombang yang signifikan pada struktur perangkat eksternal, atau akselerasi tinggi dari pergerakan masa air yang mungkin merusak struktur atau komponen listrik atau mekaniknya. Tantangan-tantangan ini harus diatasi melalui penelitian teknis untuk mengidentifikasi mode kegagalan perangkat dan untuk meningkatkan perilaku dinamisnya dalam kondisi gelombang ekstrem, termasuk efek hidro-elastis (Felix *et al.*, 2019).



Gambar 4.14 Tantangan Pengembangan PLTGL di Wilayah Tropis

Sumber: Felix *et al.* (2019)

Pemeliharaan merupakan salah satu langkah preventif yang perlu dilakukan daripada perbaikan yang lebih mahal untuk dilakukan. Hal ini juga dapat mencegah kerusakan akibat lingkungan. Karena kebanyakan PLTGL adalah struktur laut dengan bagian yang bergerak seperti artikulasi atau kabel, kelelahan struktural menjadi perhatian penting. Felix *et al.*, (2019) menyebutkan bahwa Inspeksi berkala diperlukan untuk memverifikasi kondisi komponen listrik dan mekanik, serta untuk memastikan pelumasan komponen yang bergerak, sehingga menghindari gesekan di antara mereka. Temperatur yang tinggi di daerah tropis dapat mempercepat penyebaran

mikroorganisme air di dalam perangkat, sehingga degradasi komponen yang diinduksi *biofouling* merupakan ancaman yang sangat nyata.

4.6.3 Upaya Pengembangan PLTGL

Ada tiga tahapan penting dalam pengembangan PLTGL yang perlu diperhatikan. Tahapan tersebut meliputi penentuan lokasi, penentuan teknologi PLTGL, dan terakhir instalasi. Ketiganya membutuhkan ketepatan yang didasarkan pada riset penelitian yang akurat.

Laws dan Eps (2016) menyarankan pemilihan lokasi yang cocok untuk ekstraksi energi gelombang di daerah tropis harus dilakukan melalui penilaian teoritis dan teknis sumber daya, yaitu memperkirakan daya kotor dengan data yang tersedia atau simulasi. Setelah identifikasi awal lokasi potensial dilakukan, evaluasi yang lebih spesifik harus menelaah lebih lanjut teknologi prospektif (yaitu, penilaian teknis). Di wilayah tropis, keanekaragaman hayati lebih melimpah daripada di wilayah lain di dunia, sehingga pembatasan ekologis juga harus lebih diperhatikan. Akhirnya, analisis tekno-ekonomi daerah harus dilakukan untuk mengidentifikasi lokasi yang paling menguntungkan untuk investasi.

Berkaitan dengan pemilihan teknologi pembangkit gelombang, dua cara diusulkan. Cara pertama adalah dengan menghadirkan prototipe siap pakai yang sesuai untuk mencapai kondisi operasional, pada efisiensi maksimum di lokasi prospektif. Cara kedua menggunakan PLTGL yang ada diadaptasi sesuai karakteristik gelombang di lokasi prospektif. Untuk opsi kedua, kontrol kualitas selama proses desain diperlukan. Validasi dan pengujian operasional juga diperlukan, sehingga pedoman seperti Tingkat Kesiapan Teknologi harus diikuti (De Rose *et al.*, 2017).

Pada saat instalasi PLTGL, kondisi substrat, lingkungan, dan masalah logistik semuanya dapat mempengaruhi kegiatan instalasi. Studi rinci terkait dengan kondisi geomorfologi dan oseanografi dari lokasi potensial untuk penyebaran diperlukan untuk memprediksi perubahan kekuatan substrat. Penelitian diperlukan untuk merancang prosedur

instalasi, yang sesuai dengan peraturan internasional terkait dengan penyebaran infrastruktur laut. Hal penting lainnya yang perlu dipertimbangkan adalah upaya logistik yang diperlukan untuk memperoleh Bahan, peralatan, atau mesin tambahan atau Pelengkap untuk pemasangan; sangat penting untuk mempertimbangkan lokasi yang dekat dengan instalasi pesisir, angkatan laut, atau lepas pantai dengan infrastruktur untuk penyimpanan, suplai, dan transportasi komponen.

Berdasarkan analisis potensi yang telah dilakukan dan memperhatikan kendala-kendala yang dihadapi dalam pengembangan PLTGL, strategi yang dipilih untuk pemanfaatan PLTGL di Perairan Selatan Pulau Jawa adalah mengembangkan teknologi PLTGL yang lebih efisien sesuai karakteristik Perairan Selatan Pulau Jawa. Ada pun beberapa strategi pendukung yang dapat menguatkan strategi tersebut antara lain:

- a. Melakukan evaluasi Pengembangan PLTGL yang telah dilakukan.
- b. Menyusun peta jalan dan perencanaan pengembangan PLTGL.
- c. Merealisasikan pengembangan PLTGL yang telah direncanakan.
- d. Bekerja sama dengan pihak-pihak terkait dalam hal pembiayaan dan *transfer knowledge* dari negara-negara yang telah berhasil mengembangkan energi gelombang laut.

Kerja sama pengembangan PLTGL dapat dilakukan dengan beberapa negara yang telah mengembangkan desain konverter energi gelombang. Aderinto dan Li (2018) menyebutkan banyak negara telah melihat beberapa perkembangan dalam perencanaan, pemasangan, dan pengoperasian konverter energi gelombang. Meskipun jumlahnya masih rendah dibandingkan dengan sumber energi terbarukan lainnya, seperti matahari dan angin, kemajuan menunjukkan bahwa minat dan kesadaran akan energi gelombang laut sebagai sumber energi yang tersedia semakin

meningkat. Informasi yang ditunjukkan pada Tabel x merupakan data yang dihimpun hingga akhir 2016. Perlu dicatat bahwa semua instalasi WEC yang termasuk dalam Tabel x ini belum dalam tahap komersialisasi, dan WEC pada tahap desain prototipe atau konseptualisasi tidak disertakan.

Tabel 4.7 Negara-negara yang Telah Mengembangkan PLTGL (kW)

Negara	Rencana	Terpasang	Beroperasi	Total
Canada	0	0	11	11
New Zealand	0	20	0	20
Denmark	39	12	1	52
Italy	0	150	0	150
Mexico	200	0	0	200
Ghana	0	0	450	450
Spain	0	230	296	526
Korea	0	0	665	665
China	0	400	300	700
Portugal	350	0	400	750
United States	1335	500	30	1865
Sweden	0	0	3200	3200
Ireland	5000	0	0	5000

Sumber: Aderinto & Li (2018)

4.6.4 Peran PLTGL dalam Mendukung Ketahanan Energi

Dr. Nono Suprayetno dari DJEBTKE KESDM menjelaskan bahwa energi gelombang laut merupakan salah satu alternatif energi bersih yang dapat memperkuat ketahanan energi. Energi gelombang laut memiliki potensi yang cukup besar. Menurut KESDM, sebagai negara maritim Indonesia memiliki potensi yang cukup besar yaitu sekitar 1,99 GW. Energi gelombang laut juga merupakan pembangkit EBT sehingga dapat meningkatkan bauran EBT. KESDM berkomitmen dalam pencegahan perubahan iklim dunia dan memiliki target EBT sebesar 23% di tahun 2025, untuk mencapai target tersebut potensi EBT di Indonesia harus dimanfaatkan secara optimal, termasuk memanfaatkan energi laut, sebagai pembangkit listrik. Dalam Peraturan Menteri ESDM No. 50 Tahun 2017

disebutkan bahwa Pembangkit Listrik yang memanfaatkan Tenaga Gerakan dan Perbedaan Suhu Lapisan Laut adalah arus laut, gelombang laut, pasang surut laut (*tidal*), atau perbedaan suhu lapisan laut (*ocean thermal energy conversion/OTEC*). Pada RUPTL 2021 – 2030, pengembangan Pembangkit EBT yang direncanakan juga meliputi pembangkit listrik tenaga air laut.

Potensi energi gelombang laut yang ada masih perlu dikembangkan lebih lanjut untuk menghadapi beberapa hal. Salah satunya adalah belum adanya teknologi konversi yang matang, di mana pada umumnya teknologi konversi energi gelombang laut dikembangkan di Eropa Barat dan Amerika Utara yang memiliki kondisi hidro-oseanografi dan morfologi dasar laut yang sangat berbeda dengan di Indonesia. Hal yang kedua adalah aspek keekonomian. Dengan belum matangnya dan belum adanya teknologi konversi energi laut secara komersial maka harga energi dari konversi energi gelombang laut masih belum cukup kompetitif dibandingkan teknologi energi bersih lain misalnya energi surya, hidro, bayu ataupun panas bumi. Diharapkan dengan perkembangan teknologi konversi ke depan yang semakin maju maka harga energi dari teknologi laut akan makin kompetitif dan dapat dijadikan alternatif dalam penyediaan energi bersih. Berdasarkan Peraturan Presiden Republik Indonesia No. 79 Tahun 2014 tentang Kebijakan Energi, ketahanan energi didefinisikan melalui pasal 1 yang berbunyi “Ketahanan Energi adalah suatu kondisi terjaminnya ketersediaan Energi dan akses masyarakat terhadap Energi pada harga yang terjangkau dalam jangka panjang dengan tetap memperhatikan perlindungan terhadap Lingkungan Hidup”. Melalui pengertian tersebut, maka ketahanan energi dapat terbangun melalui konsep 4A+1S, yakni ketersediaan (*availability*), kemampuan akses (*accessibility*), keterjangkauan harga (*affordability*) dan penerimaan masyarakat (*acceptability*), serta keberlanjutan (*sustainability*). Berdasarkan definisi tersebut, peneliti menjabarkan peran PLTGL dalam mendukung ketahanan energi:

a. Ketersediaan

Dari sisi ketersediaan, Indonesia sebagai negara maritim yang diapit oleh dua samudera memiliki potensi besar energi gelombang laut terutama di Perairan Selatan Pulau Jawa. Kalkulasi yang dilakukan peneliti berdasarkan data CMS menunjukkan bahwa Perairan Selatan Pulau Jawa memiliki kerapatan daya atau fluks energi gelombang laut sebesar 20 – 35 kW/m. Selain itu, para narasumber juga memberikan keterangan bahwa Perairan Selatan Pulau Jawa merupakan salah satu wilayah yang memiliki potensi energi gelombang yang besar.

b. Kemampuan akses

Letak Perairan Selatan Pulau Jawa yang dekat dengan Pulau Jawa memiliki peluang energi gelombang yang dipanen dapat dimanfaatkan langsung oleh masyarakat terutama Pulau Jawa. Jika nantinya PLTGL berhasil dikembangkan di Perairan Selatan Pulau Jawa, maka energi yang dihasilkan dapat diteruskan melalui grid Jawa-Madura-Bali di gardu-gardu yang terletak di Pesisir Selatan Pulau Jawa (Tabel 4.3). Namun, pengoperasian pembangkit di tengah laut memang tidak semudah di darat. Karenanya perlu perencanaan yang matang dalam pengembangan tersebut.

c. Keterjangkauan harga

Dalam penelitian ini, harga energi gelombang laut belum dikaji secara mendalam. Namun berdasarkan keterangan para narasumber, untuk saat ini biaya yang diperlukan untuk pengembangan, instalasi, dan pemeliharaan PLTGL masih cenderung mahal. Hal tersebut dapat berpengaruh pada investasi awal yang diperlukan dan harga yang ditawarkan.

Karenanya, pengembangan teknologi yang lebih efisien masih perlu dilakukan untuk menghasilkan teknologi yang andal dalam memanen energi gelombang dan dapat menyesuaikan dengan karakter Perairan Selatan Pulau Jawa.

d. Penerimaan masyarakat

Dalam penelitian ini, aspek sosial belum dikaji lebih mendalam. Namun, PLTGL yang merupakan energi terbarukan memiliki peluang besar untuk dapat diterima dengan baik di masyarakat. Selain itu, PLTGL juga mampu mendukung aktivitas masyarakat pesisir seperti *cold storage* untuk ikan bagi nelayan. Namun, analisis lebih lanjut diperlukan untuk menjelaskan penerimaan masyarakat terutama masyarakat pesisir yang akan berhubungan erat jika PLTGL ini berhasil diimplementasikan.

e. Keberlanjutan

PLTGL yang merupakan energi terbarukan tentu memberikan dampak besar bagi aspek keberlanjutan dalam ketahanan energi. PLTGL dapat meningkatkan bauran EBT yang ditargetkan memiliki bauran sebesar 23% di tahun 2025. Untuk mencapai target tersebut, potensi EBT di Indonesia harus dimanfaatkan secara optimal termasuk memanfaatkan energi laut sebagai pembangkit listrik.