

## Simulasi Gelombang Laut Untuk Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut (PLTGL)

Parjiman

Pendidikan Teknik Elektro  
Universitas Negeri Jakarta  
Jakarta, Indonesia  
parjiman@unj.ac.id

Daryanto

Pendidikan Teknik Elektro  
Universitas Negeri Jakarta  
Jakarta, Indonesia  
daryanto@unj.ac.id

Massus Subekti

Pendidikan Teknik Elektro  
Universitas Negeri Jakarta  
Jakarta, Indonesia  
massus.subekti@unj.ac.id

Muhammad Rif'an

D3 Teknik Elektronika  
Universitas Negeri Jakarta  
Jakarta, Indonesia  
m.rifan@unj.ac.id

**Abstrak**— Potensi sumber daya maritim terbesar sebagai sumber energi terbarukan untuk menghasilkan energi listrik adalah gelombang laut. Indonesia dengan garis pantai terbesar kedua memiliki potensi yang sangat besar dengan kerapatan mencapai 20 kW/m<sup>2</sup> gelombang laut. Namun demikian belum ada yang mampu menghasilkan sistem pembangkit listrik yang optimal dalam mengubah energi gelombang laut menjadi energi listrik. Hal ini terjadi karena sebagian besar peneliti membangun sistem pembangkit listrik tenaga gelombang laut secara langsung. Dalam makalah ini akan dibangun model simulasi gelombang laut yang menjadi komponen utama dalam pengembangan sistem pembangkit listrik tenaga gelombang laut. Dengan adanya model simulasi gelombang laut secara visual dan tervalidasi, pengembangan sistem pembangkit tenaga gelombang laut menjadi lebih mudah dan optimal.

**Kata Kunci**— Energi Terbarukan, Gelombang Laut, Pembangkit Listrik, PLTGL.

### I. PENDAHULUAN

Saat ini, peningkatan kebutuhan akan energi dan peningkatan gas rumah kaca akibat penggunaan bahan bakar fosil, menyebabkan penggunaan sumber energi terbarukan memiliki potensi yang lebih besar dari sebelumnya. Salah satu sumber energi terbarukan yang belum dimanfaatkan

sepenuhnya adalah energi gelombang laut. Energi gelombang laut pada dasarnya berasal dari angin, yang awalnya juga berasal dari energi matahari. Pada saat angin berhembus di atas permukaan lautan, gesekan menimbulkan gerakan air dan menghasilkan gelombang. Walaupun jumlah energi gelombang laut jauh lebih rendah dari jumlah energi surya, namun energi gelombang laut memiliki kerapatan yang jauh lebih padat dari pada energi surya. Energi gelombang memiliki kurang lebih lima kali lebih padat dari energi surya, atau kepadatan mencapai 2-3 kW/m<sup>2</sup>[1].

Hal ini membuat energi gelombang laut menjadi sebuah sumber energi terbarukan yang lebih baik, tetapi dengan syarat dapat ditemukan cara yang efisien untuk mengekstraknya. Studi tentang mengubah energi mekanik dalam gelombang laut untuk listrik yang berguna telah banyak dilakukan misalnya Sistem penggerak kaku (*rigid-drive-system*) yang merupakan sistem pemanenan energi yang memaksa armatur generator linier untuk secara sempurna melacak (atau cermin) elevasi permukaan gelombang laut tanpa amplifikasi atau atenuasi amplitudo; Sistem penggerak langsung (*direct-drive-system*) yang merupakan sistem pemanenan energi yang mencoba memaksa armatur generator linier untuk melacak (atau cermin) elevasi permukaan gelombang laut, namun tidak dapat melakukannya dengan sempurna, sehingga terjadi redaman amplitudo; dan Sistem penggerak-resonansi (*resonant-drive-*

system) yang merupakan sistem pemanenan energi yang memungkinkan armatur generator linier dan / atau pelampung bergema, dan memperkuat, elevasi permukaan gelombang laut [2-6]. Namun demikian belum ada yang berhasil mendapatkan ekstraksi yang optimal. Untuk itu beberapa peneliti juga telah membuat alat bantu untuk mengkonversi energi gelombang laut menjadi energi listrik melalui simulasi [7] dan [8].

Indonesia adalah salah satu negara di dunia yang memiliki wilayah laut terbesar. Sekitar dua per tiga wilayah Indonesia adalah laut. Indonesia memiliki pantai kedua terpanjang di dunia setelah Kanada. Hal tersebut menjadi keuntungan bagi Indonesia dari segi besarnya potensi energi laut. Energi laut yang dihasilkan dari gerakan dan perbedaan suhu lapisan laut (samudera) merupakan sumber energi di perairan laut yang berupa energi pasang surut, energi gelombang, energi arus laut, dan energi perbedaan suhu lapisan laut. Daerah samudera Indonesia sepanjang pantai selatan Jawa sampai Nusa Tenggara adalah lokasi yang memiliki potensi energi gelombang cukup besar berkisar antara 10 - 20 kW per meter gelombang.

Beberapa penelitian menyimpulkan bahwa energi gelombang di beberapa titik di Indonesia bisa mencapai 70 kW/m di beberapa lokasi. Pantai barat Pulau Sumatera bagian selatan dan pantai selatan Pulau Jawa bagian barat juga berpotensi memiliki energi gelombang laut sekitar 40 kW/m.

Karakteristik energi gelombang sangat sesuai untuk memenuhi kebutuhan energi kota-kota pelabuhan dan pulau-pulau terpencil di Indonesia. Namun demikian, pengembangan teknologi pemanfaatan energi gelombang di Indonesia saat ini meskipun cukup menjanjikan namun masih belum optimal.

Oleh karena itu, pada penelitian ini akan dibangun model simulasi gelombang yang akan digunakan untuk pengembangan teknologi sistem pembangkit listrik tenaga gelombang laut. Model matematika dari gelombang akan diturunkan dan disimulasikan. Dengan model matematika ini dapat diuji karakteristik dan perilaku gelombang serta desain sistem teknologi pembangkit listrik tenaga gelombang laut yang telah dibuat.

Model matematika dari gelombang laut dikembangkan dengan menggunakan program komputasi numerik MATLAB dan program simulasi grafis Simulink. Sistem ini terdiri dari model matematika gelombang dan ponton yang digabung menjadi satu sistem persamaan diferensial parsial. Sebuah antarmuka pengguna grafis dikembangkan sehingga dapat diatur parameter input, mulai dari simulasi hingga melihat hasil simulasi. Dengan adanya simulasi gelombang laut secara visual dan dapat diubah-ubah parameternya, maka akan lebih memudahkan para peneliti untuk mengembangkan sistem pembangkit listrik tenaga gelombang laut secara optimal dan dengan biaya yang lebih murah.

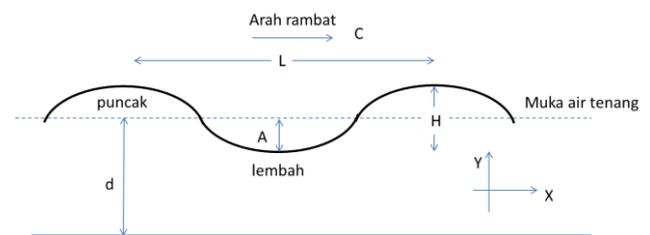
## II. ENERGI GELOMBANG LAUT

### A. Teori Gelombang Airy

Berdasarkan gaya pembangkit, gelombang laut dapat dikelompokkan menjadi tiga kategori yaitu (1) gelombang angin yang dibangkitkan oleh angin di permukaan laut (2) gelombang pasang surut dibangkitkan oleh gaya tarik benda – benda langit khususnya matahari dan bulan, (3) gelombang tsunami yang terjadi karena letusan gunung berapi atau gempa di laut.

Dalam penelitian ini, untuk mensimulasikan gelombang digunakan teori Airy menggunakan persamaan Laplace untuk aliran tak rotasi dengan kondisi batas di dasar laut dan di permukaan air. Dalam teori Airy, asumsi yang digunakan adalah (1) zat cair adalah homogen dan tidak termampatkan, sehingga rapat masa adalah konstan; (2) tegangan permukaan diabaikan; (3) Gaya coriolis (akibat perputaran bumi diabaikan); (4) tekanan pada permukaan air adalah seragam dan konstan; (5) zat cair adalah ideal, sehingga berlaku aliran tak rotasi; (6) dasar laut adalah horizontal, tetap dan impermeable sehingga kecepatan vertikal di dasar adalah nol; (7) amplitudo gelombang kecil terhadap panjang gelombang dan kedalaman air; dan (8) gerak gelombang berbentuk silinder yang tegak lurus arah penjalaran gelombang sehingga gelombang adalah dua dimensi.

Teori Airy menggunakan koordinat kartesian, gelombang berada pada system koordinat x-y dan menjalar pada sumbu x (Gambar 1).



Gambar 1. Gelombang Teori Airy

Dengan  $d$  : jarak antara muka air rerata dan dasar laut (kedalaman laut);  $a$  : amplitudo gelombang  $H$  : tinggi gelombang =  $2a$ ;  $L$  : panjang gelombang, yaitu jarak antara dua puncak gelombang yang berurutan;  $T$  : Periode gelombang, yaitu interval waktu yang diperlukan oleh partikel air untuk kembali pada kedudukan yang sama dengan kedudukan sebelumnya;  $C$  : Kecepatan rambat gelombang =  $L/T$ .

Hubungan antara cepat rambat gelombang dengan panjang gelombang dan kedalaman dinyatakan pada persamaan (1).

$$C = \frac{gT}{2\pi} \tanh \frac{2\pi d}{L} \quad (1)$$

dengan  $g$  adalah gaya gravitasi. Sedangkan hubungan panjang gelombang sebagai fungsi kedalaman dinyatakan pada persamaan (2)

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh \frac{2\pi d}{L} \quad (2)$$

Pada teori Airy, dengan membandingkan antara kedalaman air dan panjang gelombang  $L$ , ( $d/L$ ), gelombang dapat diklasifikasikan menjadi tiga macam dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Klasifikasi Gelombang Menurut Teori Airy

Keterangan	Gelombang Laut Dangkal	Gelombang Transisi	Gelombang Laut Dalam
$d/L$	$d/L \geq 1/2$	$1/20 < d/L < 1/2$	$d/L \leq 1/20$
$\tanh(2\pi d/L)$	$\approx 2\pi d/L$	$\tanh(2\pi d/L)$	$\approx 1$
C	$L/T = \sqrt{gd}$	$L/T = gT$ $\tanh(2\pi d/L)/2\pi$	$L/T = gT/2\pi$
L	$T\sqrt{gd}$	$\frac{gT^2}{\tanh(2\pi d/L)/2\pi}$	$gT^2/2\pi$

### B. Energi Gelombang

Partikel air pada gelombang bergerak dalam jalur melingkar karena kekuatan yang diberikan oleh gelombang. Tingkat perpindahan massa dan momentum oleh gelombang sesuai dengan persamaan (3).

$$I = mx = \frac{\rho a^2 g}{2c} \quad (3)$$

dengan  $\rho$  adalah massa jenis air laut.

Gaya yang diberikan oleh gelombang pada benda mengambang atau terendam per satuan lebar sesuai dengan persamaan (4).

$$F = \frac{1}{4} \rho g (ai^2 + ar^2 - at^2) \left(1 + \frac{2kh}{\sinh kh}\right) \quad (4)$$

dengan  $ai$  (kejadian),  $ar$  (tercermin), dan  $at$  (ditransmisikan) amplitudo gelombang. Pada kondisi laut dalam maka  $h \rightarrow \infty$ , sehingga persamaan (4) menjadi

$$F = \frac{1}{4} \rho g (ai^2 + ar^2 - at^2) \quad (5)$$

Turunan gaya terhadap fluks pada momentum horisontal di bidang vertikal dan fluks tanpa gelombang, karena tekanan hidrostatik menghasilkan

$$P = -\rho gh \quad (6)$$

Sehingga total energi yang terdiri dari energi potensial dan kinetik seperti yang diberikan oleh teori Airy menjadi

$$Ep = Ek = \frac{\rho gh^2 \lambda b}{16} \quad (7)$$

Seingga energi total dari gelombang adalah

$$E = Ep + Ek = \frac{\rho gh^2 \lambda b}{8} \quad (8)$$

Energi potensial akibat tinggi gelombang dan energi kinetik akibat pergerakan partikel air. Seiring pergerakan gelombang, gelombang memindahkan energi dari titik ke titik sesuai arah rambat. Kekuatan gelombang mengikuti

$$P = \left(\frac{1}{4} \rho g a^2\right) (gc)(b) \quad (9)$$

### C. Respon Benda terkena Gelombang

Gelombang memiliki gaya dan ketika mengenai benda yang ditempatkan di laut, gelombang mengerahkan kekuatan pada benda tersebut. Gaya yang diberikan oleh gelombang bersifat periodik dan terutama bergantung pada tinggi gelombang, periode sesuai persamaan

$$F \cos \omega t \quad (10)$$

Gaya reaksi benda terhadap gaya gelombang merupakan gaya restorasi, gaya redaman (gesekan), dan ekstraksi energy dengan persamaan

$$F \cos \omega t - Dy - Sy = my \quad (11)$$

Seperti persamaan (11), dapat diamati bahwa gaya redaman ( $Dy$ ) berbanding lurus dengan kecepatan dan sebanding dengan perpindahan ( $y$ ).

Frekuensi gaya redaman alami akibat ekstraksi energi sesuai dengan persamaan

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{S}{m}} \quad (12)$$

$S$  merupakan gaya reaksi benda ( $N$ ) dan  $m$  adalah massa benda.

Daya yang diekstraksi dapat ditentukan dengan

$$P = Dy^2 \quad (13)$$

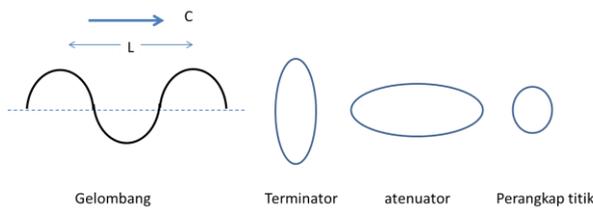
Berdasarkan persamaan (13) maka daya rata-rata pada benda yang diberikan gelombang adalah

$$P = \frac{1}{2} D y^2 = \frac{1}{2} D \alpha^2 \omega^2 \quad (14)$$

Dengan  $\alpha$  adalah koefisien berat benda dan D adalah faktor redaman.

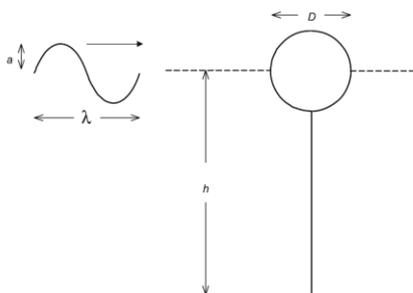
### III. SISTEM PLTGL

Konsep pengembangan PLTGL saat ini berjumlah sangat besar dan berdasarkan memanfaatkan sumber energi gelombang. Konsep yang berbeda dapat dikategorikan dalam beberapa kelas yang berbeda, Namun sebagian besar memiliki istilah yang sama yaitu terminator, attenuator dan point absorber. Terminator adalah perangkat dengan ekstensi horisontal besar sejajar dengan arah perambatan gelombang, sedangkan attenuator memiliki ekstensi horisontal besar ortogonal terhadap arah propagasi gelombang. Sedangkan, Perangkat titik kontras dengan ekstensi kecil dibandingkan dengan panjang gelombang dominan gelombang yang ada (Gambar 2).



Gambar 2. Skala dan Orientasi Terminator, Atenuator, dan Perangkat Titik

Pergerakan ponton yang diletakkan di atas permukaan laut akibat gelombang terdiri dari tiga mode gerak translasi (*surgey, sway, heave*) dan tiga mode gerak rotasi (*roll, pitch dan yaw*) mengacu pada koordinat (x, y, z), seperti ditunjukkan pada Gambar 3. Ponton terendam sebagian, dan sebagai penyerap titik bila memiliki diameter yang cukup kecil, atau sebagai attenuator atau terminator jika sebaliknya.



Gambar 3. Skematik ponton melampung di atas permukaan laut

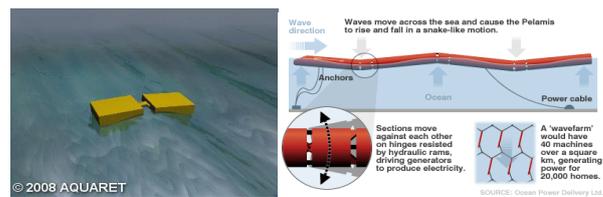
Pergerakan ponton ini akibat adanya gelombang dimanfaatkan untuk menghasilkan energy listrik. Hal ini

dilakukan dengan memadukannya dengan generator secara langsung atau dengan memodifikasi pergerakan memanfaatkan bandul yang dikompling dengan magnet sedemikian rupa atau juga sebagai pemompa air laut untuk ditampung yang selanjutnya dialirkan ke generator memanfaatkan jatuh terjun.

Beberapa sistem yang telah dibangun adalah sebagai berikut:

#### A. Attenuator

Prinsip dasar jenis ini adalah dengan cara meletakkan alat konversi di permukaan air laut untuk mengkonversi energi gelombang laut menjadi energi listrik.

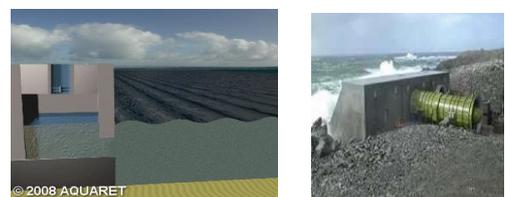


Gambar 4 (a) Attenuator, (b) Pelamis

Dengan prinsip yang sama juga ada model pelamis. Merupakan pembangkit listrik yang dikembangkan oleh Inggris dan negara-negara Eropa lainnya.

Penemuan lain yang menggunakan prinsip yang sama yaitu Pembangkit Listrik Tenaga air Gelombang Laut (PLTA-GL) yang mengkonversi energy Vertikal gelombang laut dengan bantuan tuas ke dalam energy potensial air dalam bentuk reservoir (penampung) dan menjadi pembangkit listrik tenaga air

#### B. Oscillating Water Column (OWC)



Gambar 5 (a) Oscillating Water Column, (b) Limpet

Oscillating Water Column (OWC) menggunakan prinsip tekanan udara yang dihasilkan oleh gelombang laut dalam suatu ruangan tertutup untuk memutar turbin). Masih ada limpet yang menggunakan prinsip serupa dengan memanfaatkan gerakan gelombang laut yang dapat memberikan tekanan udara pada tempat tertutup dan menghasilkan udara bertekanan yang digunakan untuk menggerakkan turbin.

**C. Overtopping Device**

Overtopping Device merupakan peralatan penjebak air laut ke dalam suatu tempat di tengah laut, air yang terkumpul secara berkesinambungan digunakan untuk memutar turbin yang terletak di bawah peralatan penjebak air laut tersebut.

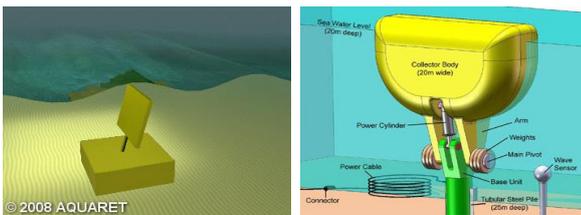


Gambar 6 (a) Overtopping Device, (b) Wave Dragon

Pemanfaatan penjebak air laut banyak jenisnya, salah satunya yaitu Wave Dragon. Dengan menggunakan penangkap gelombang, air laut diarahkan ke satu tempat penampungan air terpusat, kemudian air dikontrol penggunaannya untuk memutar turbin yang terletak di bawah alat konversi.

**D. Oscillating Wave Surge Converter (OWSC)**

Oscillating Wave Surge Converter merupakan alat konversi tenaga ombak yang memanfaatkan energi horizontal gelombang laut

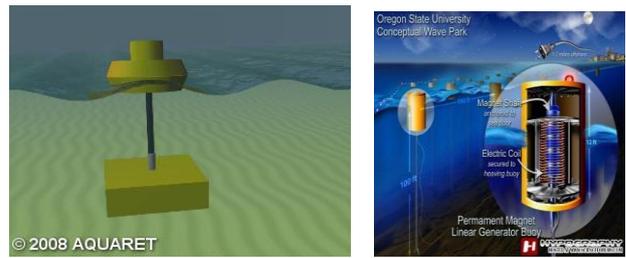


Gambar 7 (a) Oscillating Wave Surge Converter b) Wraspa

Prinsip yang sama digunakan oleh wraspa, dengan meletakkan alat konversi di dasar laut memanfaatkan energi horizontal gelombang laut untuk dikonversi menjadi energi listrik

**E. (Axisymmetrical) Point Absorber**

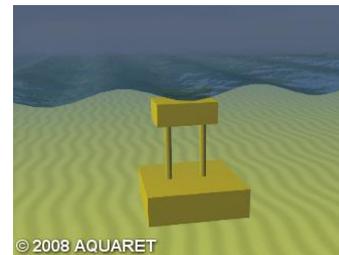
(Axisymmetrical) Point Absorber merupakan alat konversi energi gelombang dengan penempatan pelampung dipermukaan laut, memanfaatkan energi vertikal dari gelombang laut untuk menghasilkan listrik. Penggunaan teknologi yang sama yaitu pada Aegir Dynamo™ dan Permanent Magnet Linear Buoy, yaitu dengan memanfaatkan energi vertikal dengan pelampung yang diletakkan dipermukaan air laut untuk mengkonversikan energi gelombang menjadi energi penggerak turbin



Gambar 8 (a) Point Absorber, (b) Permanent Magnet Linear Buoy

**F. Submerged Pressure Differential**

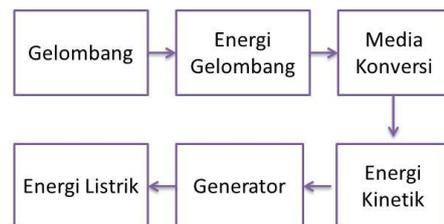
Submerged Pressure Differential tidak jauh berbeda dengan Point Absorber, hanya saja pelampung yang digunakan tidak terletak pada permukaan, melainkan di dalam laut.



Gambar 9 Submerged Pressure Differential

**IV. SIMULASI DAN HASIL**

Pembangkit listrik tenaga gelombang laut menggunakan media yang berbeda untuk konversi energi, dan menurut jenis media dapat dibagi menjadi: “duck”, Pendulous, kolom air berosilasi, dan ponton [9]. Semua media daya gelombang laut mengandung dua tahap konversi energi. Pertama, bisa mengubah energi laut menjadi energi kinetik pada bagian akuisisi. Pada tahap kedua, generator rotor akan dipaksa oleh peralatan transmisi, yang mengubah energi kinetik menjadi daya listrik untuk beban seperti disajikan pada gambar 10.

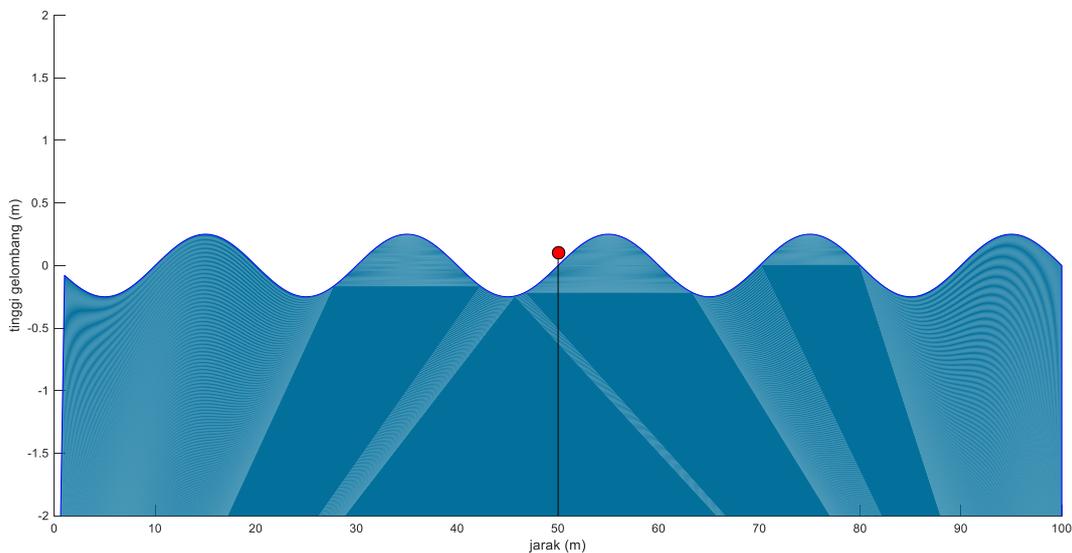


Gambar 10 Konversi Energi Gelombang Laut

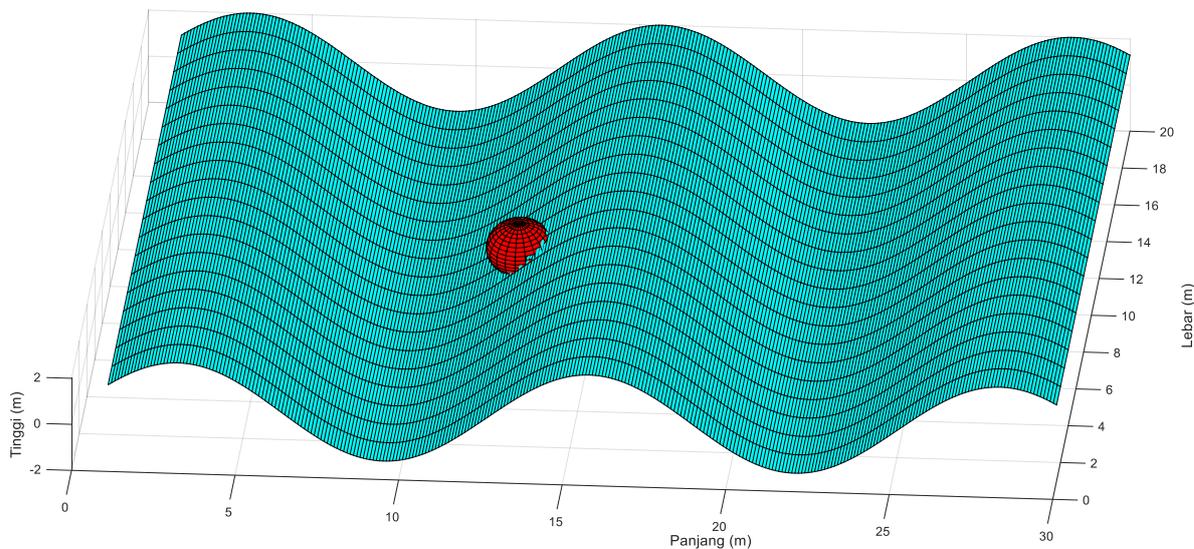
Pada Penelitian ini akan disimulasikan blok diagram Gelombang, Energi Gelombang yang dibangkitkan, media konversi, dan Energi Kinetik yang dihasilkan. Media Konversi yang digunakan adalah Ponton. Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak MATLAB dengan parameter input berupa  $d$  (kedalaman laut);  $a$  (amplitudo gelombang);  $L$  (

panjang gelombang); dan  $C$  (Kecepatan rambat gelombang). Pada percobaan ini digunakan kedalaman laut adalah 20m, panjang gelombang adalah 20m, tinggi gelombang 0,5m dan kecepatan rambat gelombang adalah 5m/s.

Hasil simulasi bentuk gelombang dan ponton disajikan pada Gambar 11 dan Gambar 12.



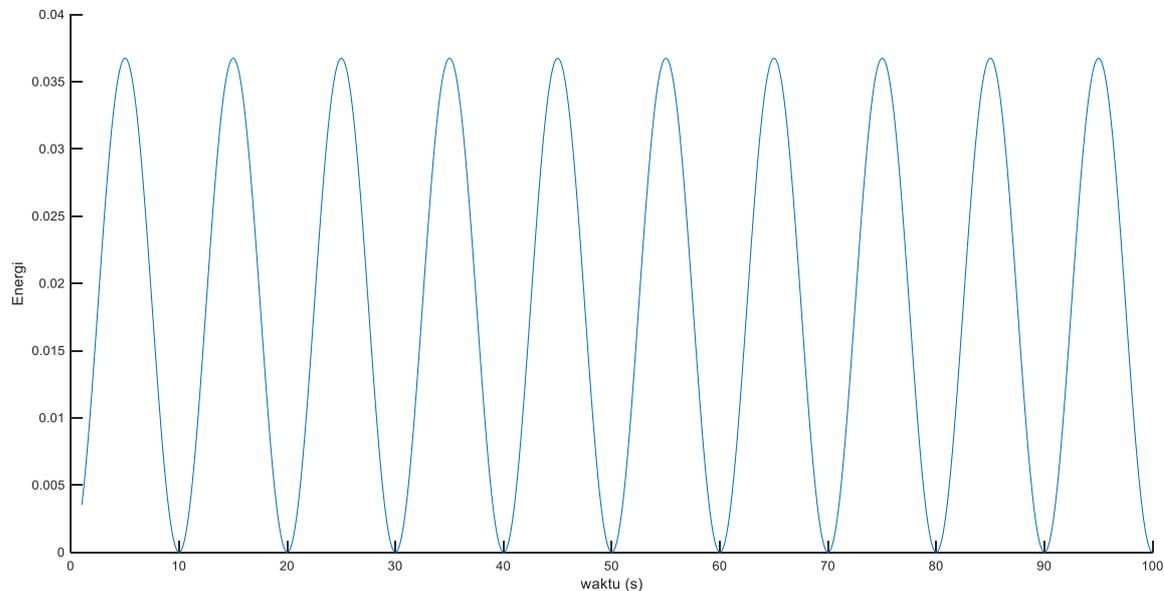
Gambar 10 Simulasi Gelombang dan Ponton 2D



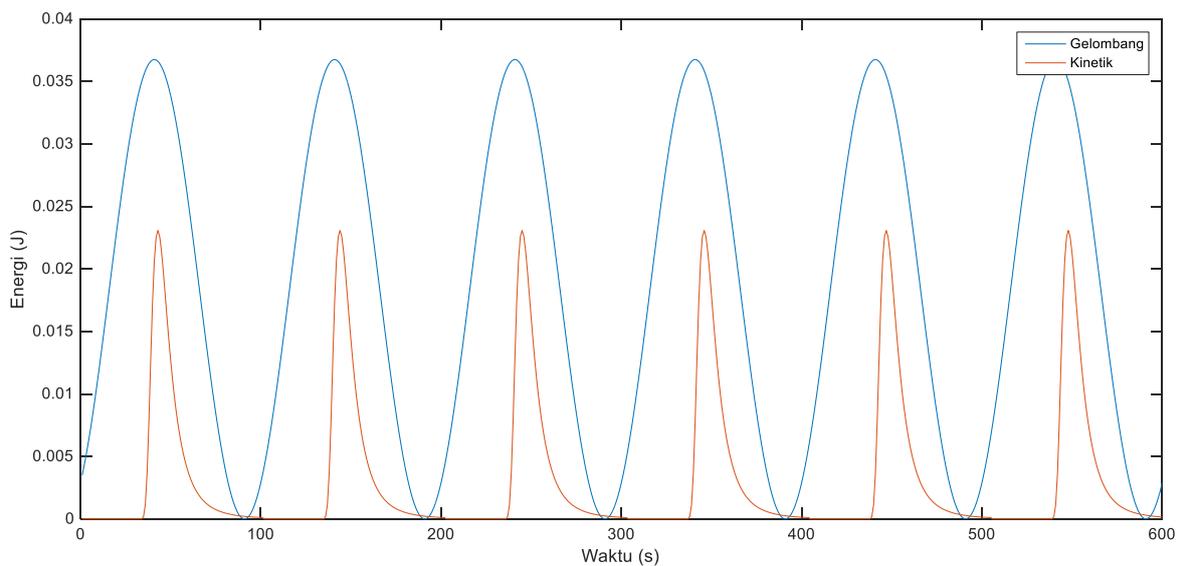
Gambar 11 Simulasi Gelombang dan Ponton 3D

Energi Gelombang Laut yang dibangkitkan disajikan pada Gambar 12. Dari Gambar 12 dapat dilihat bahwa Energi gelombang maksimum pada ketinggian gelombang 0,5m adalah sebesar 0.036 joule sesuai dengan persamaan (9).

Dengan menggunakan media perantara ponton, energi gelombang diubah menjadi energi kinetik dan hasil simulasi disajikan pada Gambar 13. Energi kinetik yang dibangkitkan setelah ditransformasikan ke ponton, maksimum energi yang dihasilkan adalah 0,022 joule sesuai dengan persamaan (14).



Gambar 12 Energi Gelombang



Gambar 13 Energi Kinetik Ponton

#### V. KESIMPULAN

Pada makalah ini telah dibahas model Simulasi gelombang Laut untuk Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut. Pendekatan yang digunakan adalah numerik dan grid memanfaatkan MATLAB. Hasil simulasi yang didapat adalah sesuai dengan perhitungan manual sehingga Simulasi yang dikembangkan dapat digunakan untuk pengembangan sistem PLTGL selanjutnya.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih terhadap pihak yang membantu terselesaikannya penelitian ini. Ucapan terima kasih juga kami sampaikan kepada tim editorial Jurnal Teknologi Elektro atas dipublikasikannya penelitian ini.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] Czech, B.; Bauer, P., "Wave Energy Converter Concepts: Design Challenges and Classification," in *Industrial Electronics Magazine*, IEEE, vol.6, no.2, pp.4-16, June 2012 doi: 10.1109/MIE.2012.2193290
- [2] D. Elwood, S. C. Yim, J. Prudell, C. Stillinger, A. von Jouanne, T. Brekken, A. Brown, R. Paasch, "Design, construction, and Ocean testing of a taut-moored dual-body wave energy converter with a linear generator power take-off," *Renewable Energy*, vol. 35, no. 2, pp. 348-354, 2010.
- [3] D. Elwood, A. Schacher, K. Rhinefrank, J. Prudell, S. Yim, E. Amon, T. Brekken, A. von Jouanne, "Numerical Modeling and Ocean Testing of a Direct-Drive Wave Energy Device Utilizing a Permanent Magnet Linear Generator for Power Take-Off," 28th Int. Conf. On Ocean, Offshore and Arctic Eng., Honolulu, HI, USA, OMAE2009, vol. 4, pp. 817-824, 2009.
- [4] M. Stalberg, R. Waters, O. Danielsson, and M. Leijon, "Influence of Generator Damping on Peak Power and Variance of Power for a Direct Drive Wave Energy Converter," *Journal of offshore mechanics and Arctic engineering*, ASME, vol. 130, no. 3, 2008.
- [5] A. R. Grilli, J. Merrill, S. T. Grilli and M. L. Spaulding, "Experimental and numerical study of spar buoy-magnet-spring oscillators used as energy absorbers," in *Proc. 17th Intl. Conf. Offshore and Polar Eng.*, No. 2007-JSC-569, 2007.
- [6] K. Rhinefrank, E. B. Agamloh, A. von Jouanne, A. K. Wallace, J. Prudell, K. Kimble, J. Aills, E. Schmidt, P. Chan, B. Sweeny and A. Schacher, "Novel ocean energy permanent magnet linear generator buoy," *Renewable Energy*, vol. 31, no. 9, pp. 1279-1298, 2006.
- [7] Ratanak So; Sean Casey; Sam Kanner; Asher Simmons; Ted K. A. Brekken, PTO-Sim: Development of a power take off modeling tool for ocean wave energy conversion, 2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting
- [8] Jakir Hossain; Sarder Shazali Sikander; Eklas Hossain, A wave-to-wire model of ocean wave energy conversion system using MATLAB/Simulink platform, 2016 4th International Conference on the Development in the Renewable Energy Technology (ICDRET)
- [9] Robertson, B.R.D., Hiles, C.E., Buckham, B.J.: Characterizing the near shore wave energy resource on the west coast of Vancouver Island, Canada. In: IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots & Systems, pp. 665–678 (2014)