

Perancangan Generator Linier Magnet Permanen Model Tubular Sebagai Pembangkit Energi Alternatif Berbasis Gelombang Laut Tipe Pelampung

Briter Ovandika Kurniawan¹, Sujito²

¹Prodi Teknologi Rekayasa Pembangkit Energi, Fakultas Vokasi, Universitas Negeri Malang
Jl. Semarang No. 5 Lowokwaru, Malang, Jawa Timur 65145, Indonesia

²Departemen Teknik Elektro dan Informatika, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Malang
Jl. Semarang No. 5 Lowokwaru, Malang, Jawa Timur 65145, Indonesia

¹briter.ovandika.2005315@students.um.ac.id

²sujito@ft.um.ac.id

Intisari — Potensi energi gelombang laut di Indonesia sangat besar namun belum dapat dimanfaatkan secara optimal. Permasalahan utama dalam pemanfaatan energi gelombang laut ini ada pada teknologi konversinya yang masih membutuhkan mekanisme yang kompleks. Generator Linier Magnet Permanen (GLMP) banyak dikembangkan sebagai konverter energi gelombang laut karena memiliki efisiensi yang tinggi dan trukturnya lebih sederhana tanpa perangkat tambahan mekanisme yang kompleks. Penelitian ini berfokus pada desain generator linier magnet permanen dengan parameter utama yang diperhatikan adalah konfigurasi magnetiknya yaitu magnet permanen sebagai eksitasi dan jumlah lilitan. Untuk mendapatkan konfigurasi yang optimal penelitian dimulai dari analisis konfigurasi magnetik dengan simulasi *Finite Element Analysis* (FEA) untuk mengamati distribusi medan magnet dan tegangan yang dihasilkan. Selanjutnya dilanjutkan pembuatan dan pengujian *prototype* generator linier magnet permanen dalam skala laboratorium. Hasil dari simulasi FEA menunjukkan distribusi medan magnet yang dihasilkan cukup besar yaitu pada titik maksimum sebesar 0,39 Tesla dan pada titik minimumnya sebesar 0,19 Tesla. Kemudian *output* tegangan yang dihasilkan antar fasanya adalah R-S= 146 V, R-T=136 V, dan S-T=149 V. Hasil *output* tegangan *prototype* GLMP generator tanpa beban pada tegangan AC adalah R-S= 1,8 V, R-T=1,6 V, dan S-T=1,8 V. Kemudian pada tegangan DC adalah 1,5 V. Untuk hasil pengujian generator dengan variasi beban resistor menunjukkan hasil yang sama ketika beban resistor 10 Ω tegangan yang dihasilkan menurun sedangkan ketika nilai beban ditambahkan 20-50 Ω tegangan menjadi meningkat. Hal ini disebabkan oleh pengaruh impedansi internal pada generator. Dari hasil penelitian yang dilakukan terdapat perbedaan tegangan yang dihasilkan hal ini terjadi karena pada simulasi mesin dirancang dengan model yang sederhana sehingga mengabaikan faktor eksternal. Berbeda dengan pengujian *prototype* yang membutuhkan desain mekanisme sistem yang kompleks. Namun penelitian ini telah menunjukkan bahwa GLMP dapat diimplementasikan sebagai konverter energi gelombang laut.

Kata kunci — Generator Linier, Magnet Permanen, Gelombang Laut, FEA..

Abstract — The potential of ocean wave energy in Indonesia is very large but has not been optimally utilized. The main problem in the utilization of ocean wave energy is the conversion technology that still requires a complex mechanism. Permanent Magnet Linear Generators (GLMP) are widely developed as ocean wave energy converters because they have high efficiency and simpler structures without additional complex mechanism devices. This research focuses on the design of permanent magnet linear generators with the main parameters considered are the magnetic configuration, namely permanent magnets as excitation and the number of turns. To get the optimal configuration, the research starts from analyzing the magnetic configuration with Finite Element Analysis (FEA) simulation to observe the magnetic field distribution and the resulting voltage. This is followed by the manufacture and testing of a permanent magnet linear generator prototype on a laboratory scale. The results of the FEA simulation show that the magnetic field distribution produced is quite large, namely at the maximum point of 0.39 Tesla and at the minimum point of 0.19 Tesla. Then the resulting voltage output between the phases is R-S = 146 V, R-T = 136 V, and S-T = 149 V. The results of the prototype GLMP generator voltage output without load on AC voltage are R-S = 1.8 V, R-T = 1.6 V, and S-T = 1.8 V. Then the DC voltage is 1.5 V. For the generator test results with variations in resistor loads, the results show the same results when the resistor load is 10 Ω the resulting voltage decreases while when the load value is added 20-50 Ω the voltage increases. This is due to the influence of internal impedance on the generator. From the results of the research conducted, there is a difference in the voltage produced, this occurs because the engine simulation is designed with a simple model so that it ignores external factors. In contrast to prototype testing which requires a complex system mechanism design. However, this research has shown that GLMP can be implemented as an ocean wave energy converter.

Keywords— Linear Generator, Permanent Magnet, Ocean Wave, FEA.

I. PENDAHULUAN

Sumber Energi Baru dan Terbarukan (EBT) di Indonesia memiliki potensi yang beragam bergantung pada kondisi wilayahnya [1]. Menurut data dari Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (KESDM) potensi EBT di Indonesia mencapai 3.686 GW, namun belum seluruhnya potensi tersebut dapat dimanfaatkan secara optimal seperti energi laut yang memiliki potensi sebesar 60 GW [2]. Salah satu energi dari laut yang dapat dimanfaatkan adalah energi gelombang laut yang banyak tersedia di perairan Indonesia [3]. Pemanfaatan energi gelombang laut di Indonesia dapat memberikan peluang yang besar dalam penyediaan sumber energi alternatif yang ramah lingkungan, mengingat Indonesia merupakan negara maritim yang besar dan beberapa lokasi yang berhadapan dengan Samudera Hindia dan Samudera Pasifik memberikan potensi yang besar untuk di eksplorasi lebih dalam [4].

Teknologi konversi energi gelombang laut yang ada saat ini kebanyakan menggunakan generator putar yang masih memerlukan perangkat tambahan yang dapat mengurangi efisiensi konversi energi [5], [6]. Saat ini banyak penelitian dan pengembangan teknologi konversi energi gelombang laut menggunakan Generator Linier Manet Permanen (GLMP) [7], [8]. GLMP banyak dipilih karena strukturnya yang sederhana tanpa perangkat tambahan yang membuat sistem ini lebih efisien jika dibandingkan dengan generator putar [9], [10]. GLMP dapat dihubungkan langsung dengan sistem penangkap gelombang laut secara langsung yang disebut dengan sistem *Direct Drive Wave Energy Conversion* (DD-WEC) [11], [12]. Sistem DD-WEC mengkonversi gerakan gelombang laut yang ditangkap oleh pelampung yang terhubung oleh *translator* GLMP yang terdapat medan magnet sebagai eksitasi [13]. Dari gerakan medan magnet pada *translator* yang mengikuti gerak gelombang laut fluks magnet yang memotorng kumparan pada stator akan menghasilkan listrik sehingga menjadikan proses konversi energi lebih efisien tanpa

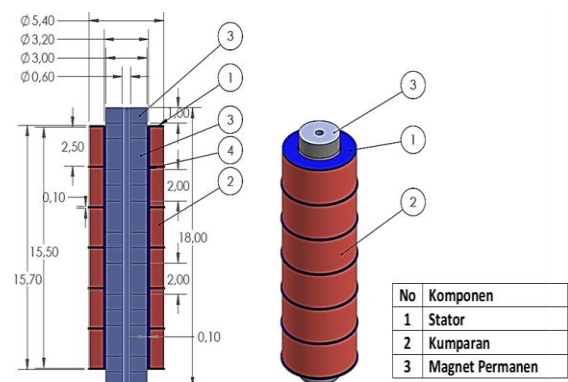
kehilangan energi yang disebabkan oleh kerugian mekanis [14].

Melihat potensi dari energi gelombang laut yang besar di Indonesia namun belum dapat dimanfaatkan secara optimal tersebut maka diperlukannya inovasi pengembangan teknologi konversi energi gelombang laut yang sesuai dengan keadaan laut di Indonesia. Oleh karena itu, pada penelitian ini membahas perancangan generator linier magnet permanen sebagai konverter energi gelombang laut. Penelitian ini berfokus pada desain generator linier magnet permanen dengan parameter utama yang diperhatikan adalah konfigurasi magnetiknya yaitu magnet permanen sebagai eksitasi dan jumlah lilitan. Untuk mendapatkan konfigurasi yang optimal penelitian dimulai dari analisis konfigurasi magnetik dengan simulasi *Finite Element Analysis* (FEA) untuk mengamati distribusi medan magnet dan tegangan yang dihasilkan. Selanjutnya dilanjutkan pembuatan dan pengujian *prototype* generator linier magnet permanen dalam skala laboratorium.

II. METODE

A. Perancangan Desain GLMP

Seperti halnya mesin listrik pada umumnya generator linier terdiri dari dua komponen utama yaitu rotor atau *translator* merupakan bagian yang bergerak dan stator merupakan bagian tetap yang terdapat kumparan [15]. Desain dari GLMP yang dirancang dapat dilihat dalam Gambar 1 kemudian untuk parameternya dapat dilihat dalam Tabel 1 untuk stator dan Tabel 2 untuk rotor.



Gbr. 1 Desain 3D generator linier magnet permanen (GLMP)

Tabel 1. Parameter stator

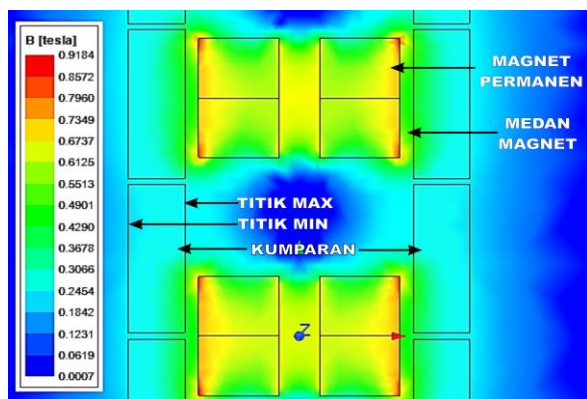
No	Parameter	Nilai
1	Panjang stator	15,7 cm
2	Diameter dalam stator	3,2 cm
3	Diameter luar stator	5,4 cm
4	Jumlah slot	6 Buah
5	Tinggi per slot	2,5 cm
6	Celah udara	0,1 cm
7	Tebal Stator	0,1 cm
8	Jumlah fasa	3 Fasa
9	Jumlah kumparan per fasa	2 Kumparan
10	Jumlah kumparan total	6 Kumparan
11	Jumlah lilitan per kumparan	850 Lilitan
12	Material	PLA

Tabel 2. Parameter rotor

No	Parameter	Nilai
1	Eksitasi	Magnet Permanen
2	Jumlah Magnet	10 Buah
3	Susunan Magnet	<i>Axial Flux</i>
4	Jenis magnet	NdFeB 52
5	Model magnet	Cincin
6	Diameter luar magnet	3 cm
7	Diameter dalam magnet	6 cm
8	Tinggi magnet	1 cm
9	Jarak antar magnet	1 cm
10	Tinggi total magnet	18 cm

B. Simulasi Finite Element Analysis (FEA)

Untuk mengamati performa dari GLMP yang dirancang dilakukan simulasi untuk menganalisis konfigurasi magnetik. Parameter yang diamati dalam simulasi adalah distribusi medan magnet, fluks magnetik, dan output tegangan yang dihasilkan. Metode simulasi yang dipilih dalam penelitian ini adalah *Finite Element Analysis* (FEA) yang dapat melakukan analisis elektromagnetik secara virtual dan *real time*. Pemodelan dari simulasi FEA dapat dilihat dalam Gambar 2.



Gbr. 2 Tampilan hasil simulasi FEA distribusi medan magnet GLMP

C. Pengujian Prototype GLMP

Pengujian *prototype* GLMP dilakukan didalam laboratorium dan pengujian dilakukan dalam dua tahap yaitu pengujian generator tanpa beban dan berbeban dengan beban yang digunakan resistor 10 - 50 Ω . Kemudian hasil yang diamati adalah *output* tegangan AC dan DC. Karena *output* dari generator adalah tegangan AC 3 fasa yang dihubung secara delta maka tegangan AC yang diukur adalah tegangan antar fasanya yaitu R-S, R-T, dan S-T. kemudian untuk pengukuran tegangan DC *output* terminal generator disarankan menggunakan komponen elektronika *dioda rectifier*.

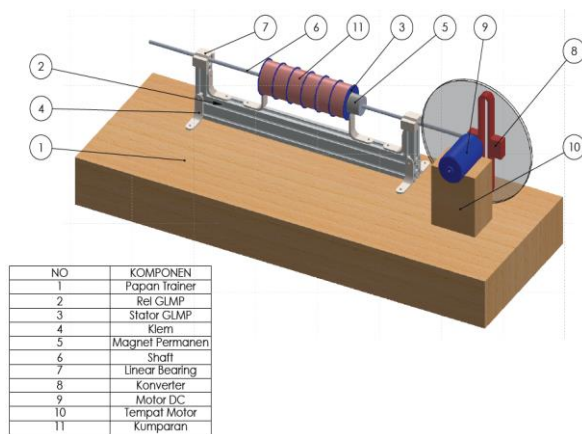
Kecepatan gerak *translator* yang digunakan berdasarkan referensi kecepatan gelombang laut selatan Jawa Timur. Berdasarkan referensi [16] tinggi gelombang laut rata-rata yang didapatkan adalah sebesar 0,44 m dan periode gelombang rata-rata sebesar 3,30 m/s pada bulan April 2024. Kecepatan gelombang laut yang digunakan diasumsikan konstan dan bergerak secara vertikal seperti gelombang sinusoidal maka untuk menentukan kecepatan gelombang laut dapat dihitung menggunakan persamaan berikut [17].

$$h = \frac{H}{2} \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (1)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{3,55 \cdot \sqrt{H}} \quad (2)$$

$$v = \omega \frac{H}{2} \cdot \cos(\omega \cdot t) \quad (3)$$

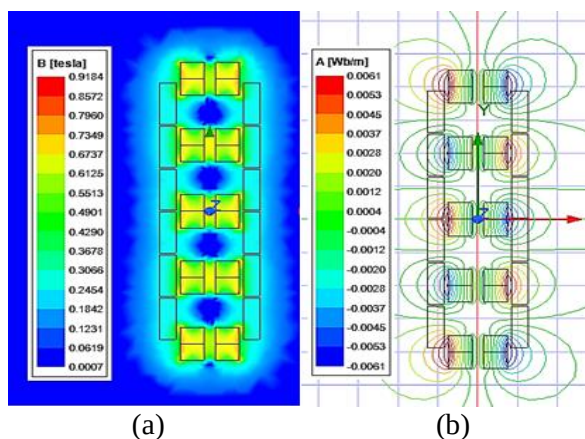
Dimana H tinggi gelombang rata-rata dalam meter (m), h merupakan amplitudo gelombang, ω merupakan kecepatan sudut gelombang dalam radius/sekon (rad/s), dan v kecepatan gerak linier dalam meter/sekon (m/s). Kemudian gambaran pengujian *prototype* GLMP dapat dilihat dalam Gambar 3 dimana penggerak *translator* menggunakan motor DC 12 Volt yang dihubungkan dengan *converter motion* sebagai pengubah gerak putar motor ke gerak linier. Kemudian dihubungkan dengan *translator* dari GLMP.

Gbr. 3 Desain *prototype* pengujian GLMP

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Simulasi FEA GLMP

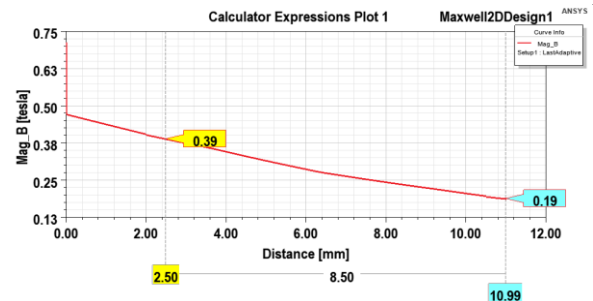
Hasil dari simulasi FEA GLMP dapat dilihat dalam Gambar 4 dimana pada (a) merupakan hasil distribusi medan magnet dan (b) merupakan hasil fluks magnet.



Gbr. 4 Hasil simulasi FEA GLMP

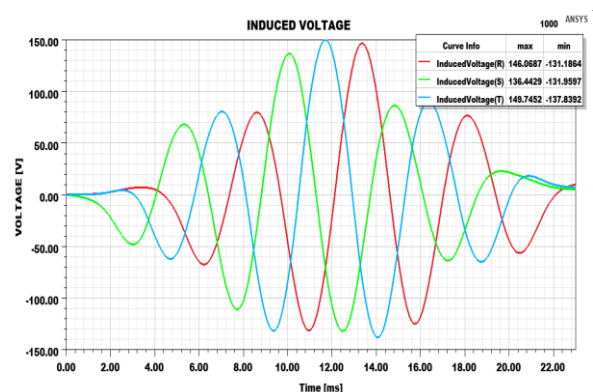
Dalam Gambar 4(a) tampak distribusi medan magnet menyebar dan melingkupi seluruh area kumparan. Hal ini disebabkan oleh magnet yang disusun secara *axial*, dimana magnet disusun bertumpuk dengan arah kutub magnet yang sama saling berhadapan pada setiap magnetnya yaitu kutub utara magnet satu berhadapan dengan kutub utara magnet kedua. Seperti yang kita ketahui bahwa magnet akan saling menarik jika bertemu dengan kutub yang berbeda yaitu arah utara dan selatan, namun jika magnet memiliki arah yang sama maka akan saling tolak menolak. Karena saling tolak menolak inilah yang menyebabkan fluks pada magnet yang terbentuk dapat menyebar keluar karena antar kutub magnetnya akan

saling memperkuat satu sama lain. Sehingga fluks magnet yang menyebar keluar dapat memotong kumparan yang menghasilkan gaya gerak listrik sesuai dengan prinsip induksi elektromagnetik Faraday.



Gbr. 5 Hasil pengukuran medan magnet yang melingkupi kumparan

Nilai medan magnet yang melingkupi kumparan dapat dilihat dalam grafik Gambar 5. Dimana pada blok berwarna kuning adalah titik maksimum atau titik lapisan kumparan yang terdekat dengan magnet. Sedangkan blok berwarna biru menunjukkan titik minimum atau titik lapisan terjauh kumparan dengan medan magnet. Dalam Gambar 5 menunjukkan medan magnet yang terdistribusi dalam kumparan pada titik maksimum sebesar 0,39 Tesla dan pada titik minimum sebesar 0,19 Tesla. Hasil dari pengukuran distribusi medan magnet menunjukkan nilai yang besar pada titik maksimum dan minimumnya.



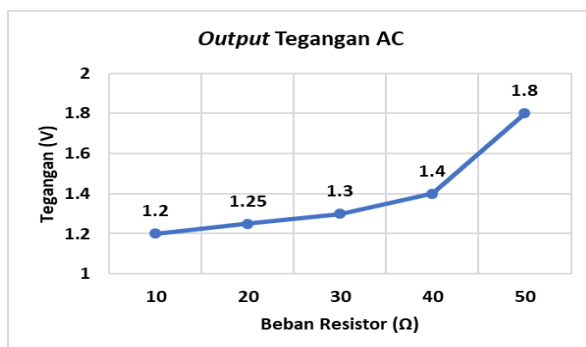
Gbr. 6 Hasil ggl induksi GLMP

Dalam Gambar 6 menunjukkan hasil ggl induksi yang dihasilkan oleh GLMP, dimana tegangan yang dihasilkan pada masing-masing fasanya adalah $R=146$ V, $S=136$ V, dan $T=149$ V. Tegangan yang ditimbulkan ini sebagai akibat dari perubahan medan magnet yang melingkupi kumparan.

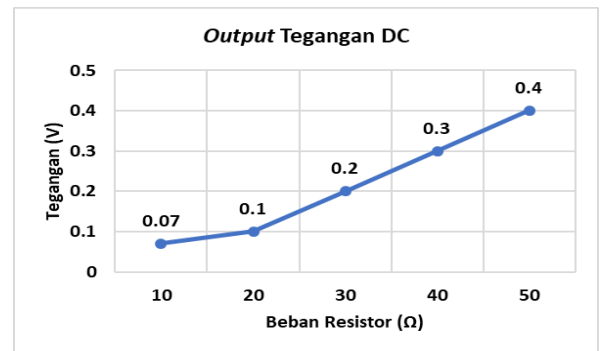
Ketika medan magnet pada *translator* bergerak yang menyebabkan adanya perubahan medan magnet pada kumparan yang menyebabkan timbulnya gaya gerak listrik (GGL) pada ujung kumparan. Hal ini sesuai dengan hukum Faraday bahwa “ggl yang timbul di antara ujung loop penghantar berbanding lurus dengan perubahan fluks magnetik yang dilingkupi oleh loop penghantar tersebut”. Kemudian tegangan AC sinyal sinusoidal yang dihasilkan disebabkan oleh perbedaan arah fluks magnet yang menginduksi kumparan sehingga arah ggl yang ditumbulkan berubah-ubah. Fenomena ini dijelaskan dalam hukum Lenz bahwa “arus listrik yang dihasilkan oleh perubahan medan magnet selalu berlawanan arah dengan perubahan medan magnet yang menyebabkannya”.

B. Pengujian Prototype GLMP

Hasil pengujian generator tanpa beban pada tegangan AC berturut-turut R-S = 1,8 V, R-T = 1,6 V, dan S-T = 1,8 V. Kemudian pada tegangan DC menghasilkan tegangan sebesar 1,5 V. Pada pengujian generator berbeban pada tegangan AC antar fasanya adalah sama pada setiap bebanya yang dapat dilihat dalam Gambar 7. Kemudian hasil pengujian generator berbeban pada tegangan DC dapat dilihat dalam Gambar 8. Tampak pada Gambar *output* tegangan generator AC dan DC memiliki hasil yang sama. Pada beban resistor 10 Ω terjadi penurunan tegangan dari tegangan *output* pada saat generator belum terbebani. Hal ini terjadi karena arus yang mengalir sangat besar sehingga menciptakan medan magnet yang kuat pada armature generator.



Gbr. 7 Grafik *output* generator tegangan AC dengan beban resistor



Gbr. 8 Grafik *output* generator tegangan DC dengan beban resistor

Medan magnet yang timbul ini berlawanan arah dengan medan magnet utama (medan magnet *translator*) yang mengakibatkan penurunan kecepatan pada *translator* sehingga *output* tegangan menurun. Kemudian ketika beban ditingkatkan menjadi 20 – 50 Ω *output* tegangan generator semakin meningkat. Hal ini disebabkan oleh meningkatnya beban resistansi yang mengakibatkan arus yang mengalir semakin kecil. Karena arus yang mengalir kecil maka medan magnet didalam generator melemah sehingga tidak ada perlawanan dengan medan magnet utama. Karena tidak adanya perlawanan tersebut membuat kecepatan gerak *translator* meningkat sehingga *output* tegangan yang dihasilkan meningkat.

IV. PENUTUP

Dari hasil penelitian yang dilakukan terdapat perbedaan tegangan yang dihasilkan hal ini terjadi karena pada simulasi mesin dirancang dengan model yang sederhana sehingga mengabaikan faktor eksternal. Berbeda dengan pengujian *prototype* yang membutuhkan desain mekanisme sistem yang kompleks. Namun penelitian ini telah menunjukkan bahwa GLMP dapat diimplementasikan sebagai konverter energi gelombang laut.

ACKNOWLEDGMENTS

Penelitian hibah skripsi dengan judul perancangan generator linier magnet permanen model tubular sebagai pembangkit energi alternatif berbasis gelombang laut tipe pelampung ini didanai oleh penelitian dan pengabdian kepada masyarakat non APBN Universitas Negeri Malang Tahun 2024.

REFERENSI

- [1] A. Sidik *et al.*, “Studi Potensi Pemanfaatan Energi Baru Terbarukan (EBT) untuk Mendukung Sistem Ketenagalistrikan di Wilayah IKN,” *J. SISKOM-KB (Sistem Komput. dan Kecerdasan Buatan)*, vol. 6, no. 2, pp. 137–144, Mar. 2023, doi: 10.47970/siskom-kb.v6i2.379.
- [2] Kesdm, “Miliki Potensi EBT 3.686 GW, Sekjen Rida: Modal Utama Jalankan Transisi Energi Indonesia,” Esdm. Accessed: Feb. 27, 2024. [Online]. Available: <https://www.esdm.go.id/id/media-center/arsip-berita/miliki-potensi-ebt-3686-gw-sekjen-rida-modal-utama-jalankan-transisi-energi-indonesia>
- [3] Mukhtasor, “Potensi dan Teknologi Energi Laut Indonesia,” 2011. [Online]. Available: <https://www.scribd.com/document/440924918/Potensi-dan-Teknologi-Energi-Laut-Indonesia-AMF3-pdf>
- [4] J. Burhanuddin, A. M. Ishak, A. S. A. Hasim, J. Burhanudin, S. M. F. B. S. M. Dardin, and T. Ibrahim, “A Review of Wave Energy Converters in the Southeast Asia Region,” *IEEE Access*, vol. 10, no. August, pp. 125754–125771, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3219101.
- [5] B. Czech and P. Bauer, “Wave Energy Converter Concepts : Design Challenges and Classification,” *IEEE Ind. Electron. Mag.*, vol. 6, no. 2, pp. 4–16, Jun. 2012, doi: 10.1109/MIE.2012.2193290.
- [6] J. Prudell, M. Stoddard, E. Amon, T. K. A. Brekken, and A. von Jouanne, “A Permanent-Magnet Tubular Linear Generator for Ocean Wave Energy Conversion,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 46, no. 6, pp. 2392–2400, Nov. 2010, doi: 10.1109/TIA.2010.2073433.
- [7] M. A. Mustapa, O. B. Yaakob, Y. M. Ahmed, C.-K. Rheem, K. K. Koh, and F. A. Adnan, “Wave energy device and breakwater integration: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 77, pp. 43–58, Sep. 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.03.110.
- [8] A. Wahyudie, M. Jama, T. B. Susilo, B. F. Mon, H. Shaaref, and H. Noura, “Design and testing of a laboratory scale test rig for wave energy converters using a double-sided permanent magnet linear generator,” *IET Renew. Power Gener.*, vol. 11, no. 7, pp. 922–930, Jun. 2017, doi: 10.1049/iet-rpg.2016.0874.
- [9] T. S. Parel, M. D. Rotaru, J. K. Sykulski, and G. E. Hearn, “Optimisation of a tubular linear machine with permanent magnets for wave energy extraction,” *COMPEL - Int. J. Comput. Math. Electr. Electron. Eng.*, vol. 30, no. 3, pp. 1056–1068, May 2011, doi: 10.1108/03321641111110997.
- [10] B. Drew, A. R. Plummer, and M. N. Sahinkaya, “A review of wave energy converter technology,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part A J. Power Energy*, vol. 223, no. 8, pp. 887–902, Dec. 2009, doi: 10.1243/09576509JPE782.
- [11] A. Raed and A. Mohammed, “FEM Based Prototype of Moving-Coil Coreless Linear-Generator (MCCLG) for Wave Energy Extraction,” *E3S Web Conf.*, vol. 64, p. 07005, Nov. 2018, doi: 10.1051/e3sconf/20186407005.
- [12] Aamir Hussain Memon, T. Bin Ibrahim, and N. Perumal, “Portable and pico-scale linear generator for wave energy conversion,” in *2014 5th International Conference on Intelligent and Advanced Systems (ICIAS)*, IEEE, Jun. 2014, pp. 1–4. doi: 10.1109/ICIAS.2014.6869479.
- [13] I. López, J. Andreu, S. Ceballos, I. Martínez de Alegría, and I. Kortabarria, “Review of wave energy technologies and the necessary power-equipment,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 27, pp. 413–434, Nov. 2013, doi: 10.1016/j.rser.2013.07.009.
- [14] Esteban, “Classification of Wave Energy Converters,” *Recent Adv. Petrochemical Sci.*, vol. 2, no. 4, Aug. 2017, doi: 10.19080/RAPSCI.2017.02.555593.
- [15] H. Prasetyo and S. Waluyo, “Optimasi Lebar Celah Udara Generator Axial Magnet Permanen Putaran Rendah 1 Fase,” *J. Nas. Tek. Elektro dan Teknol. Inf.*, vol. 4, no. 4, pp. 2–6, Feb. 2016, doi: 10.22146/jnteti.v4i4.172.
- [16] Copernicus, “Copernicus.” [Online]. Available: cds.climate.copernicus.eu
- [17] B. Azhari, F. Danang Wijaya, W. Prawinnetou, and H. Dewangga Adhyaksa, “Analytical design of sea wave energy power plant using tubular linear PM generator in southern coast of Yogyakarta, Indonesia,” in *2016 3rd International Conference on Information Technology, Computer, and Electrical Engineering (ICITACEE)*, IEEE, 2016, pp. 1–6. doi: 10.1109/ICITACEE.2016.7892433.