

# Analisis Numerik Pengaruh Kerapatan Piezoelektrik terhadap Performa Pemanenan Energi Gelombang Air Laut

<sup>1\*</sup>Irfan Satrio Mardani, <sup>2</sup>Kuni Nadliroh

<sup>1,2</sup> Teknik Mesin, Universitas Nusantara PGRI Kediri

E-mail: <sup>1</sup>[irfansastriomardani@gmail.com](mailto:irfansastriomardani@gmail.com), <sup>2</sup>[kuninadliroh@unpkediri.ac.id](mailto:kuninadliroh@unpkediri.ac.id)

**Penulis Korespondens : Irfan Satrio Mardani**

**Abstrak**—Makalah ini membahas penelitian tentang pemanenan energi piezoelektrik (PEH) yang terksitasi oleh tumbukan pendulum di sebuah kapal akibat terinduksi gelombang laut. Variasi yang diteliti adalah horizontal 10 mm (H10), horizontal 20 mm (H20), horizontal 40 mm (H40), vertikal 10 mm (V10), vertikal 20 mm (V20), dan vertikal 40 mm (V40). Variasi tersebut dipilih karena dapat mewakili rentang kerapatan tinggi hingga rendah. Penelitian dilakukan dengan metode elemen hingga menggunakan ANSYS Workbench dengan pendekatan *coupled-field transient* dengan *fixed support* di atas dan bawah pelat. Parameter performa terbaik diambil berdasarkan nilai rata-rata  $V_{RMS}$ . Hasil simulasi menunjukkan distribusi tegangan listrik terbesar berada di area pusat pelat akibat regangan yang lebih tinggi dibandingkan area tepi. Di antara 6 variasi, variasi H10 menghasilkan performa terbaik dengan rata-rata  $V_{RMS}$  sebesar 24,76 V dan variasi H40 menghasilkan performa terburuk dengan rata-rata  $V_{RMS}$  14,19 V sehingga dapat disimpulkan bahwa semakin rapat posisi piezoelektrik, semakin efektif memanen energi.

**Kata Kunci**— ANSYS, FEM, pemanenan energi, piezoelektrik

**Abstract**— This paper discusses research on piezoelectric energy harvesting (PEH) excited by pendulum impacts on a ship induced by ocean waves. The studied variations are horizontal 10mm (H10), horizontal 20mm (H20), horizontal 40mm (H40), vertical 10mm (V10), vertical 20mm (V20), and vertical 40mm (V40). These variations were chosen as they are considered capable of representing high to low density ranges. The research was conducted using FEM via ANSYS with a coupled-field transient and fixed supports at the top and bottom of the plate. The best performance parameter was determined based on the average  $V_{RMS}$  value. The results show that the largest voltage distribution is in the central area of the plate. The H10 variation yielded the best performance with an average  $V_{RMS}$  of 24.76 V, while the H40 variation produced the worst performance. Thus, it can be concluded that a closer or denser piezoelectric positioning results in more effective energy harvesting.

**Keywords**— ANSYS, energy harvesting, FEM, piezoelectric

This is an open access article under the CC BY-SA License.



## I. PENDAHULUAN

Energi terbarukan memenuhi 32% energi dunia dan 15% energi Indonesia [1]. Sebagai negara dengan perairan luas, Indonesia memiliki potensi besar untuk memanfaatkan sumber tenaga air, mencakup energi arus laut, gelombang laut, pasang-surut, dan panas laut, yang memiliki potensi sebesar 63 GW [2].

Seiring berkembangnya teknologi sensor pemantauan, kebutuhan sumber daya mandiri di lingkungan laut juga meningkat, salah satunya melalui pemanenan energi gelombang laut. Terdapat tiga mekanisme untuk mengubah energi gelombang menjadi energi listrik, yaitu generator elektromagnetik (EMG), nanogenerator triboelektrik (TENG), dan pemanenan energi piezoelektrik (PEH) [3]. Dibandingkan dua mekanisme lainnya, PEH dinilai lebih unggul karena instalasi mudah, efisiensi tinggi, output voltase tinggi, dan mampu digunakan dalam frekuensi rendah, serta tahan korosi dengan performa konsisten [4] [3].

Permasalahan utama gelombang laut adalah karakteristiknya yang memiliki frekuensi rendah. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, banyak penelitian yang berfokus pada peningkatan performa untuk gelombang berfrekuensi rendah, termasuk meningkatkan frekuensi eksitasi agar PEH dapat bekerja efektif [5].

Chen dkk. meneliti pemanenan energi gelombang piezoelektrik berbasis pick-driven (PDPWEH) dengan menggunakan gir untuk meningkatkan frekuensi dari gelombang [6], Bao dan Wang mengusulkan pemanen energi piezoelektrik dengan bilah berputar untuk mengumpulkan energi dampak gelombang [7], Liu dkk mengusulkan pemanen energi gelombang berfrekuensi rendah (L-PWEH) berbasis segmental beam dan double magnetic excitation [8], sementara Fan dkk melakukan pendekatan impact-driven atau pendulum-driven, yang terbukti mampu mengonversi energi dari frekuensi rendah menjadi frekuensi tumbukan yang tinggi [9].

Meskipun demikian, mekanisme tumbukan menciptakan tegangan lokal tinggi dan ketidaklinieran respons pada struktur, sehingga perlu memperhatikan desain distribusi regangan pada material [10]. Penelitian menunjukkan bahwa lokasi pemasangan piezoelektrik pada struktur sangat menentukan besarnya energi yang dapat dipanen. Seberapa pun ukuran modul piezoelektrik, selalu ada lokasi optimal di area pelat yang dapat menghasilkan energi maksimal. Temuan tersebut menunjukkan bahwa penggunaan banyak modul piezoelektrik memerlukan strategi penempatan yang tepat, karena respons sistem tidak selalu meningkat hanya dengan menambahkan jumlah piezoelektrik [11].

Berbagai penelitian terkait optimasi penempatan piezoelektrik pada struktur pelat telah dilakukan, tetapi masih berfokus pada variasi bentuk modul tunggal dan optimasi topologi untuk satu atau sepasang piezoelektrik [12] [13]. Sementara itu, pendekatan multi-patch yang melibatkan banyak piezoelektrik pada satu struktur lebih berfokus pada interaksi antar-patch untuk peredaman getaran, bukan pada pengaruh variasi kerapatannya terhadap performa PEH [14].

Studi mengenai efektivitas susunan piezoelektrik dengan variasi kerapatan dan orientasi pemasangan pada struktur pelat belum banyak dikaji. Informasi ini penting untuk menentukan strategi instalasi piezoelektrik yang efisien dari segi jumlah modul yang digunakan [11].

Berdasarkan permasalahan di atas, penelitian ini mengusulkan desain pemanenan energi piezoelektrik yang memanfaatkan gelombang laut untuk menginduksi gerakan bandul yang memukul pelat piezoelektrik. Penelitian ini memberikan kontribusi berupa analisis numerik pengaruh kerapatan dan orientasi pemasangan 12 modul piezoelektrik terhadap performa pemanenan energi pada pelat aluminium yang dikenai beban impak, dengan memvariasikan posisi dan kerapatan piezoelektrik secara vertikal (10 mm, 20 mm, 40 mm) dan horizontal (10 mm, 20 mm, 40 mm).

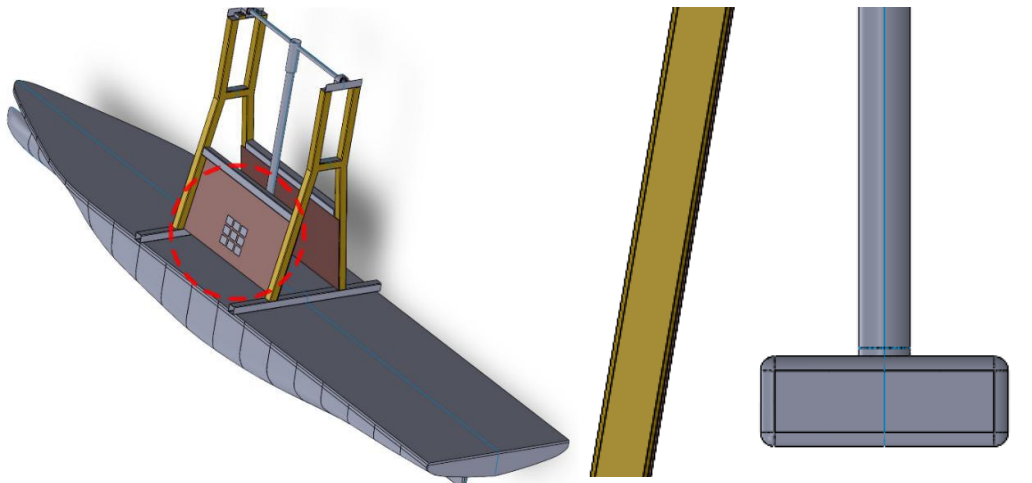
## II. METODE

Penelitian ini merupakan eksperimental berbasis simulasi numerik dengan menggunakan metode elemen hingga (*finite element method*) melalui perangkat lunak ANSYS Workbench. Prinsip utama FEM adalah menggunakan konsep diskritisasi atau pembagian suatu sistem fisik atau domain kontinu yang kompleks menjadi subbagian yang lebih kecil, sederhana, dan teratur yang disebut sebagai “elemen hingga”. Kumpulan dari elemen-elemen ini membentuk jaringan geometri yang dikenal dengan istilah mesh. Secara matematis, FEM merumuskan ulang permasalahan nilai batas berbentuk persamaan diferensial menjadi persamaan aljabar linear [15].

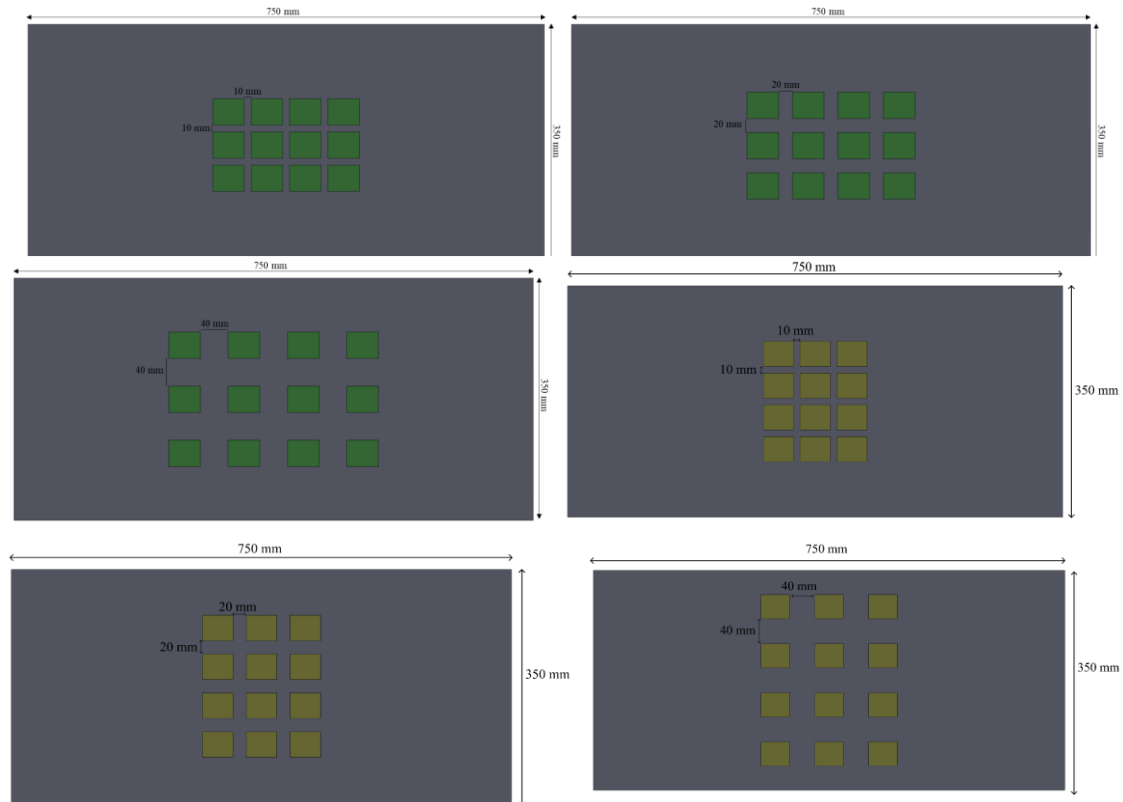
Variabel bebas dalam penelitian ini adalah kerapatan penempatan piezoelektrik pada arah vertikal dan horizontal. Masing-masing variasi kerapatannya adalah 10 mm, 20 mm, dan 40 mm. Variabel terikat yang diamati meliputi deformasi total dan nilai tegangan yang dihasilkan oleh piezoelektrik. Ada pun variabel kontrol penelitian meliputi dimensi pelat, sifat material pelat, jenis piezoelektrik, dan jumlah piezoelektrik. Skema penelitian ditunjukkan pada Gambar 1 dengan desain kapal digunakan sebagai gambaran umum penelitian ini, tetapi fokus penelitian hanya terletak pada pelat aluminium yang ditempelkan piezoelektrik.

### Desain Objek Penelitian

Kapal dipasang sebuah bandul dan pelat aluminium yang sudah terhubung 12 piezoelektrik. Kapal akan bergerak akibat dari gelombang laut yang kemudian menginduksi bandul untuk berayun sehingga memukul pelat aluminium. Benturan antara bandul dengan pelat mengakibatkan pelat piezoelektrik bergetar yang kemudian dimanfaatkan untuk melakukan pemanenan energi listrik.



Gambar 1. Gambaran Umum Penelitian



Gambar 2. Variasi Penelitian

Gambar 2 merupakan variasi yang digunakan sebagai objek penelitian. Gambar a adalah variasi pemasangan piezoelektrik horizontal 10 mm (H10), b adalah variasi H20, c adalah variasi H40, d adalah variasi pemasangan vertikal 10 mm (V10), e adalah variasi V20, dan e adalah V40. Parameter pelat dan piezoelektrik dalam penelitian ditunjukkan pada Tabel 1

Tabel 1. Tabel Parameter Pelat dan Piezoelektrik

| Parameter Pelat         |                |
|-------------------------|----------------|
| Material Pelat          | Aluminium 2024 |
| Panjang (mm)            | 750            |
| Tinggi (mm)             | 350            |
| Ketebalan (mm)          | 2              |
| Parameter Piezoelektrik |                |
| Material Piezoelektrik  | PZT-5A         |
| Panjang (mm)            | 45,7           |
| Lebar (mm)              | 38,1           |
| Ketebalan (mm)          | 0,5            |

### Simulasi ANSYS

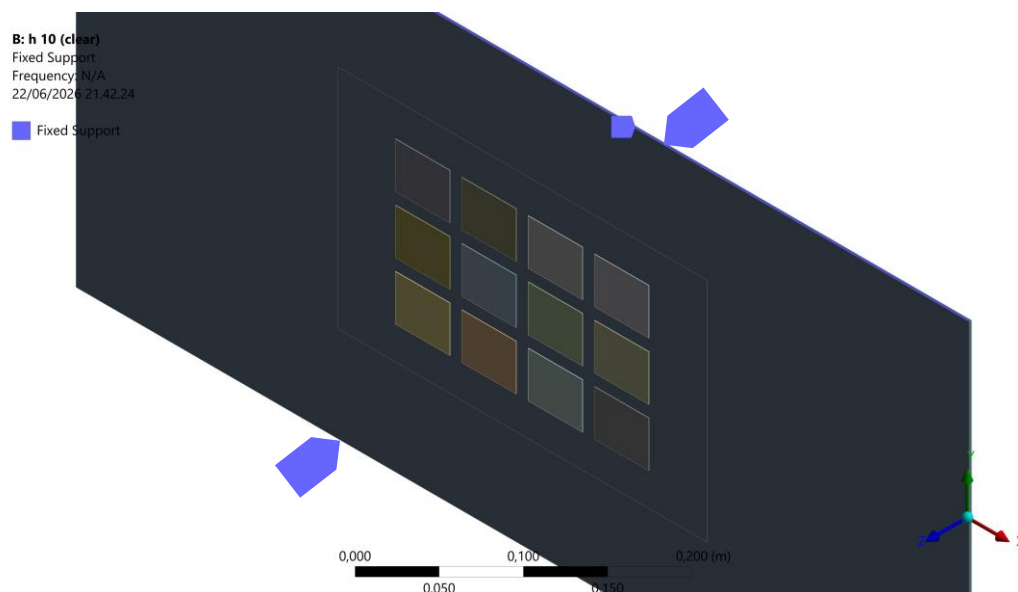
Proses simulasi ANSYS dilakukan menggunakan modul analisis Modal dan Coupled-Field Transient yang dibagi menjadi tiga tahap utama, yaitu tahap pre-processing, processing, dan post-

processing. Pada tahap pre-processing dilakukan pemilihan jenis material, meshing, dan penentuan pembebanan. Jenis material disesuaikan dengan material yang tercantum di Tabel 1. Tabel Parameter Pelat dan Piezoelektrik Tabel 1. Meshing dilakukan dengan parameter yang tercantum di Tabel 2. Tahap mesh ini tidak dilakukan proses tes konvergensi karena menggunakan lisensi Student yang memiliki keterbatasan elemen. Meskipun demikian mesh memiliki nilai Skewness rata-rata 0,1588 yang berarti memiliki kualitas baik.

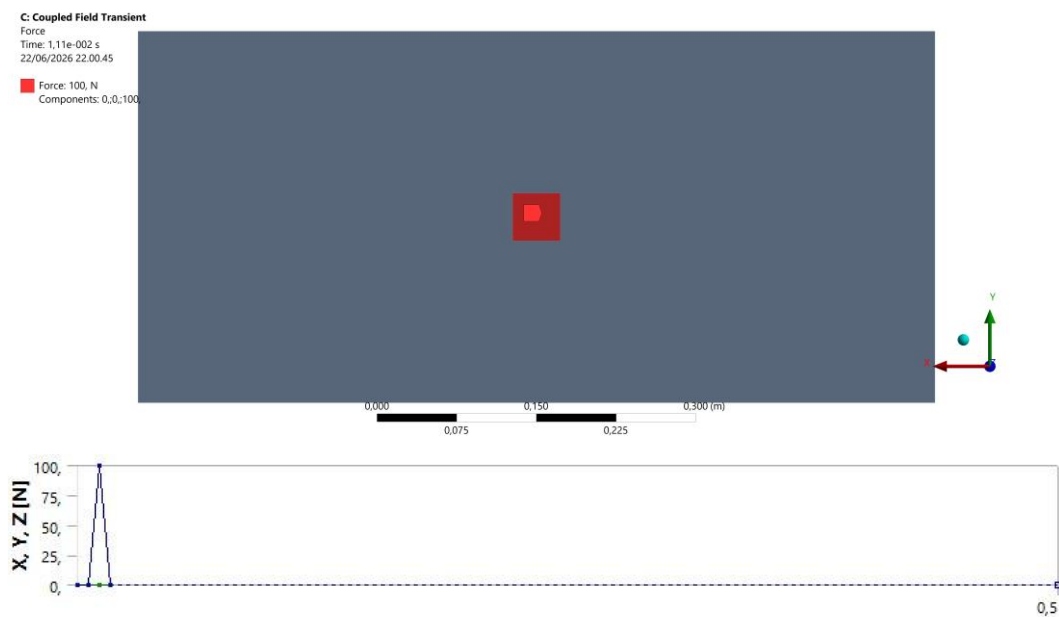
Tabel 2. Tabel Parameter Mesh

| Parameter Mesh | Keterangan          |
|----------------|---------------------|
| Metode         | Hex Dominant Method |
| Ukuran elemen  | 0,005 m             |
| Jumlah elemen  | 12.411              |
| Jumlah node    | 81.318              |

Pembebanan dilakukan dengan menambahkan kondisi batas berupa fixed support di bagian atas dan bawah pelat (Gambar 3), voltage ground dan voltage coupling di dua sisi berlawanan masing-masing piezoelektrik, serta pemberian gaya singkat sebesar 100 N arah sumbu z ke lokasi titik tumbukan—getaran diamati selama 0,5 detik (Gambar 4).



Gambar 3. Lokasi Fixed Support Pelat (Warna Ungu)

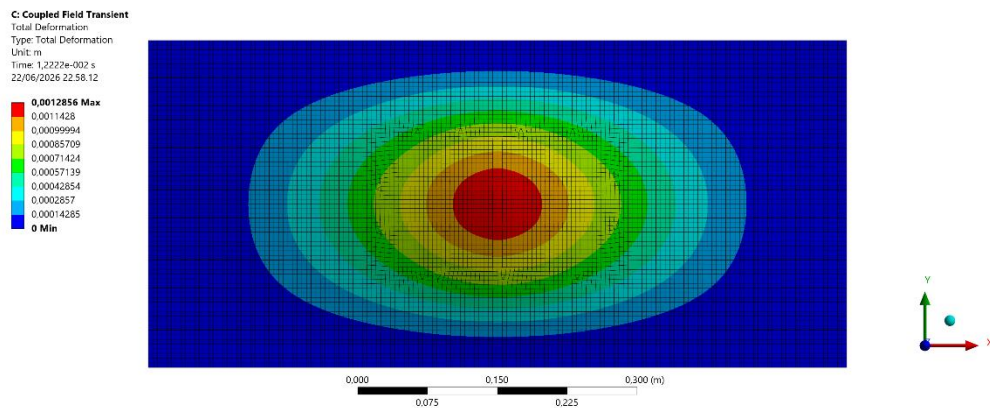


Gambar 4. Skema Pemberian Gaya pada Pelat

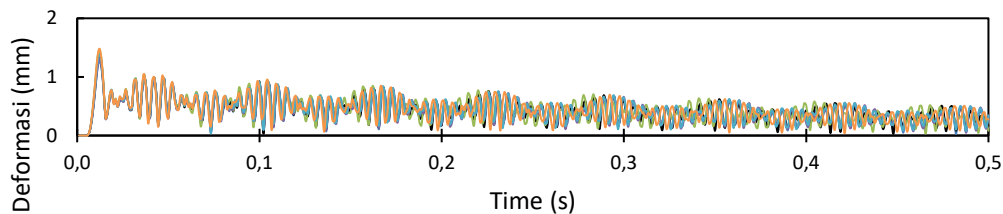
### III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pendulum berayun menumbuk pelat dengan arah sumbu z sehingga menghasilkan getaran pada pelat. Dengan adanya getaran tersebut, piezoelektrik merespons dengan mengubah getaran menjadi menghasilkan tegangan listrik. Tegangan listrik yang dihasilkan oleh piezoelektrik disimulasikan dengan metode analisis hingga. Berdasarkan hasil simulasi, pendulum akan menumbuk pelat dan menghasilkan tegangan puncak. Setelah tumbukan terlepas dari pelat, pelat bergetar pada frekuensi resonansinya.

Gambar 5 dan Gambar 6 menampilkan kontur persebaran deformasi ketika terdapat pelat yang mengalami deformasi maksimum beserta grafik deformasi terhadap waktu dari masing-masing variasi. Gambar 6 menunjukkan deformasi pelat dengan lonjakan singkat akibat pemberian gaya 100 N lalu mengalami peluruhan dengan amplitudo gelombang yang semakin mengecil setiap waktu. Dari gambar tersebut juga dapat dilihat bahwa keenam konfigurasi berimpit dengan pola deformasi yang hampir identik sehingga sangat sulit dibedakan secara visual. Hal ini menunjukkan bahwa kerapatan piezoelektrik tidak terlalu memengaruhi perubahan karakteristik dinamis pelat.



Gambar 5. Kontur Deformasi Pelat

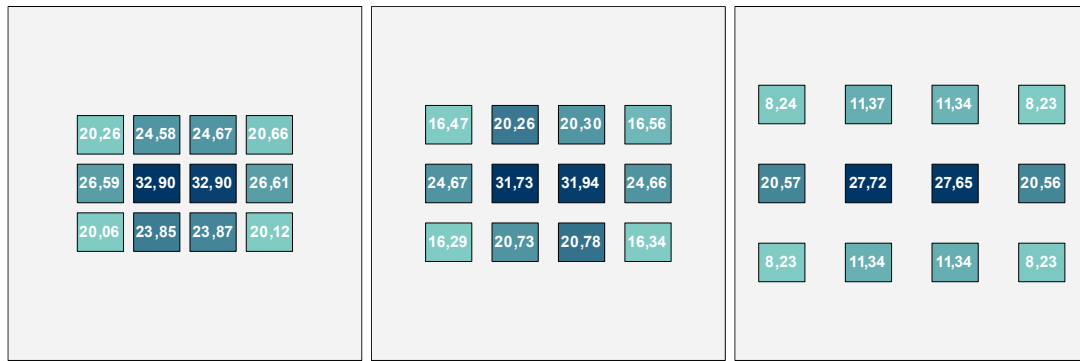


Gambar 6. Grafik Deformasi terhadap Waktu

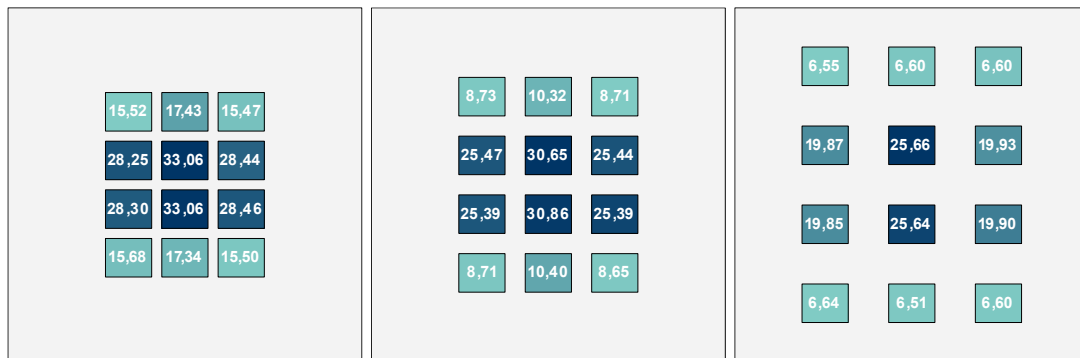
Pelat mengalami deformasi yang berbeda-beda di setiap titiknya. Deformasi tersebutlah yang akan mempengaruhi posisi pemasangan piezoelektrik yang optimal karena semakin besar deformasi yang terjadi, semakin besar pula tegangan listrik yang dapat dihasilkan oleh piezoelektrik. Simulasi di ANSYS juga dapat menunjukkan nilai tegangan listrik yang diperoleh masing-masing piezoelektrik. Hasil dari simulasi adalah nilai tegangan terhadap waktu, sehingga akan ditampilkan dalam bentuk nilai tegangan efektif ( $V_{RMS}$ ) pada masing-masing piezoelektrik agar lebih mudah dianalisis. Berikut adalah persamaan  $V_{RMS}$ :

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i^2} \quad (1)$$

Dengan nilai  $n$  adalah jumlah seluruh data yang diambil dan  $v_i$  adalah nilai tegangan listrik yang dihasilkan pada data ke- $i$  [16].



Gambar 7. Nilai Tegangan Listrik Variasi Horizontal (Dari Kiri H10, H20, H40)



Gambar 8. Nilai Tegangan Listrik Variasi Vertikal (Dari Kiri V10, V20, V40)

Gambar 7 dan Gambar 8 menunjukkan bahwa piezoelektrik yang berada di area tengah pelat selalu menghasilkan nilai  $V_{RMS}$  yang lebih tinggi daripada area tepi pelat. Hal tersebut terjadi karena area tengah merupakan area terjadinya kontak antara pelat aluminium dengan bandul, sehingga area tersebut mengalami deformasi yang lebih besar daripada area tepi.

Tabel 3. Tabel Tegangan RMS

| Variasi Kerapatan | Rata-Rata $V_{RMS}$ (V) |          |
|-------------------|-------------------------|----------|
|                   | Horizontal              | Vertikal |
| 10 mm             | 24,76                   | 23,04    |
| 20 mm             | 21,73                   | 18,23    |
| 40 mm             | 14,57                   | 14,19    |

Tabel 3 menunjukkan bahwa variasi pemasangan horizontal dan vertikal mengalami tren pereolehan tegangan yang sama, yaitu semakin renggang jarak antara piezoelektrik, semakin kecil pula nilai tegangan yang diperoleh. Pada tabel juga diperlihatkan bahwa urutan variasi yang menghasilkan tegangan tertinggi adalah H10, V10, H20, V20, H40, V40.

Dalam penelitian yang menggunakan sistem lebih dari satu piezoelektrik, pada kasus ini 12 piezoelektrik, tujuan utama penelitian bukan hanya untuk mengetahui posisi satu piezoelektrik yang menghasilkan tegangan listrik tertinggi, tetapi juga untuk memaksimalkan kontribusi seluruh piezoelektrik yang terpasang dalam menghasilkan tegangan listrik. Pada gambar dapat dilihat bahwa pada variasi H10 menghasilkan  $v$  minimal 20,12 V dan  $v$  maksimal 32,90 V, sedangkan variasi H40 menghasilkan  $v$  minimal 6,51 V dan  $v$  maksimal 25,66 V yang artinya H10 memiliki lebih banyak piezoelektrik yang berkontribusi lebih maksimal dibandingkan H40.

#### IV. KESIMPULAN

Telah dilakukan penelitian pengaruh kerapatan piezoelektrik terhadap performa pemanenan energi gelombang air laut menggunakan metode elemen hingga di ANSYS Student. Penelitian ini mensimulasikan 12 buah piezoelektrik yang diatur menjadi 6 variasi kerapatan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa distribusi tegangan RMS tertinggi selalu terjadi pada piezoelektrik yang berada di area pusat pelat, area yang mengalami regangan terbesar akibat tumbukan dengan bandul. Peningkatan jarak antar piezoelektrik menyebabkan penurunan tegangan RMS rata-rata. Konfigurasi pemasangan horizontal 10 mm (H10) menghasilkan nilai tegangan listrik RMS sebesar 24,76 V dan menjadi yang tertinggi di antara keenam variasi penelitian. Oleh karena itu, variasi pemasangan H10 dinilai sebagai variasi optimal untuk memanen energi karena mampu memanfaatkan area aktif piezoelektrik secara lebih efektif dibandingkan variasi lainnya. Walaupun memiliki beberapa keterbatasan, penelitian ini diharapkan mampu memberikan tambahan wawasan di bidang PEH. Untuk memperluas penelitian ini, direkomendasikan kepada peneliti selanjutnya untuk memvariasikan ketebalan pelat serta ketebalan piezoelektrik.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] IEA, "Renewable Energy Progress Tracker – Data Tools - IEA." Accessed: Dec. 02, 2025. [Online]. Available: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/renewable-energy-progress-tracker>
- [2] A. Kurnia and L. Fauzia, "Potensi Energi Laut Indonesia." Accessed: Dec. 02, 2025. [Online]. Available: <https://geologi.esdm.go.id/media-center/potensi-energi-laut-indonesia>
- [3] R. Liu, L. He, X. Liu, S. Wang, L. Zhang, and G. Cheng, "A review of collecting ocean wave energy based on piezoelectric energy harvester," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 59, p. 103417, Oct. 2023, doi: 10.1016/J.SETA.2023.103417.
- [4] J. Zhou, L. He, L. Liu, G. Yu, X. Gu, and G. Cheng, "Design and research of hybrid piezoelectric-electromagnetic energy harvester based on magnetic couple suction-repulsion motion and centrifugal action," *Energy Convers. Manag.*, vol. 258, p. 115504, Apr. 2022, doi: 10.1016/J.ENCONMAN.2022.115504.
- [5] H. Wang, X. Lv, L. Feng, Q. Li, H. Zhou, and L. He, "A Piezoelectric–Electromagnetic Low-Frequency Wave Energy Harvester Based on L-Shaped Beam and Upconversion Mechanism," *Journal of Electronic Materials* 2024 54:2, vol. 54, no. 2, pp. 1455–1466, Dec. 2024, doi: 10.1007/S11664-024-11633-5.
- [6] S.-E. Chen, R.-Y. Yang, Z.-H. Qiu, and C.-C. Wu, "A Piezoelectric Wave Energy Harvester Using Plucking-Driven and Frequency Up-Conversion Mechanism," *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 24, 2021, doi: 10.3390/en14248441.
- [7] B. Bao and Q. Wang, "Bladeless rotational piezoelectric energy harvester for hydroelectric applications of ultra-low and wide-range flow rates," *Energy Convers. Manag.*, vol. 227, p. 113619, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.enconman.2020.113619.
- [8] R. Liu, L. He, B. Yang, X. Li, L. Zhang, and F. Zhong, "A low-frequency piezoelectric wave energy harvester based on segmental beam and double magnetic excitation," *Energy*, vol. 302, p. 131790, Sep. 2024, doi: 10.1016/j.energy.2024.131790.
- [9] G. Fan *et al.*, "Impact-driven piezoelectric energy harvester using a pendulum structure for low-frequency vibration," *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 32, no. 17, pp. 1997–2005, Oct. 2021, doi: 10.1177/1045389X20983880/REFERENCES.
- [10] M. Rosso *et al.*, "Piezoelectric Energy Harvesting from Low-Frequency Vibrations Based on Magnetic Plucking and Indirect Impacts," *Sensors* 2022, Vol. 22, Page 5911, vol. 22, no. 15, p. 5911, Aug. 2022, doi: 10.3390/S22155911.

- [11] G. Piliposian, A. Hasanyan, and D. Piliposyan, "The effect of the location of piezoelectric patches on the sensing, actuating and energy harvesting properties of a composite plate," *J. Phys. D Appl. Phys.*, vol. 52, no. 44, p. 445501, Oct. 2019, doi: 10.1088/1361-6463/ab37be.
- [12] G. Piliposian, A. Hasanyan, G. Piliposyan, and H. Jilavyan, "On the Sensing, Actuating and Energy Harvesting Properties of a Composite Plate with Piezoelectric Patches," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology* 2020 7:3, vol. 7, no. 3, pp. 657–668, Apr. 2020, doi: 10.1007/S40684-020-00219-1.
- [13] A. G. A. Muthalif, A. Ali, J. Renno, A. N. Wahid, K. A. M. Nor, and N. H. D. Nordin, "Geometrical Investigation of Piezoelectric Patches for Broadband Energy Harvesting in Non-Deterministic Composite Plates," *Materials* 2021, Vol. 14, Page 7370, vol. 14, no. 23, p. 7370, Dec. 2021, doi: 10.3390/MA14237370.
- [14] P. Peralta-Braz, M. M. Alamdari, M. Hassan, and E. Atroshchenko, "Design of piezoelectric metastructures with multi-patch isogeometric analysis for enhanced energy harvesting and vibration suppression," *J. Sound Vib.*, vol. 619, p. 119401, Dec. 2025, doi: 10.1016/J.JSV.2025.119401.
- [15] K. H. Huebner, D. L. Dewhirst, D. E. Smith, and T. G. Byrom, *The Finite Element Method for Engineers*, 4th ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2001. Accessed: Dec. 22, 2025. [Online]. Available: [https://kolegite.com/EE\\_library/books\\_and\\_lectures/%D0%9C%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B8%D0%BA%D0%B0/K.%20H.%20Huebner%2C%20D.%20L.%20Dewhirst%2C%20D.%20E.%20Smith%2C%20T.%20G.%20Byrom%20-%20The%20Finite%20Element%20Method%20for%20Engineers-Wiley%20%282001%29.pdf](https://kolegite.com/EE_library/books_and_lectures/%D0%9C%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B8%D0%BA%D0%B0/K.%20H.%20Huebner%2C%20D.%20L.%20Dewhirst%2C%20D.%20E.%20Smith%2C%20T.%20G.%20Byrom%20-%20The%20Finite%20Element%20Method%20for%20Engineers-Wiley%20%282001%29.pdf)
- [16] J. M. Flores-Arias, M. Ortiz-Lopez, F. J. Quiles Latorre, F. J. Bellido-Outeiriño, and A. Moreno-Muñoz, "A Memory-Efficient True-RMS Estimator in a Limited-Resources Hardware," *Energies* 2019, Vol. 12, Page 1699, vol. 12, no. 9, p. 1699, May 2019, doi: 10.3390/EN12091699.