

Studi Potensi Energi Ombak Nearshore Pulau Kodingareng Keke (ERA5 2019–2025) untuk Aplikasi WEC Perairan Dangkal

Masjono^{1*},

¹Program Studi Otomasi Sistem Permesinan, Politeknik ATI Makassar, Indonesia

*Email korespondensi: masjono@yahoo.com; masjono@kemenperin.go.id

Abstract

Background: Islanded power systems need site-adapted marine renewables. We characterize the nearshore wave climate west of Kodingareng Keke at 2.5 m depth. We use ERA5 data (2019–2025) and convert sea states into variables for shallow-water wave energy converters (WECs).

Methods: We calculate finite-depth wavelength (L) and phase speed (c) from the dispersion relation ($\omega^2 = gk \cdot \tanh(kh)$). We compute line wave power (P) from H_s and $T_e \approx 0.9T$. We compile operational products, including time series, seasonal statistics, wave-rose diagrams, and exceedance diagrams.

Results: The site exhibits a low-to-moderate energy regime, with a mean H_s of approximately 0.52 m, T of roughly 4.27 s, L of approximately 19.2 m, c of approximately 4.47 m/s, and P of approximately 0.66 kW/m; the approach is dominated by S–SW.

Implications: These findings inform array orientation towards S–SW and spacing based on L (P50–P90). Tune PTO around the median period and consider the high-energy mode during DJF/SON. Set protection thresholds using H_s P90 and directional variation.

Limitations: The ERA5 dataset only covers one grid nearshore at a fixed depth. We recommend in-situ validation and detailed bathymetry.

Abstrak

Latar belakang: Sistem kelistrikan kepulauan memerlukan sumber energi laut yang teradaptasi lokasi. Studi ini mengarakterisasi iklim gelombang nearshore sisi barat Pulau Kodingareng Keke pada kedalaman $h = 2,5$ m menggunakan ERA5 (2019–2025) dan memetakan sea state ke variabel rekayasa untuk WEC perairan dangkal.

Metode: Panjang gelombang (L) dan kecepatan rambat fase (c) dihitung dari dispersi kedalaman-hingga ($\omega^2 = gk \cdot \tanh(kh)$); daya gelombang garis (P) dihitung dari H_s dan $T_e \approx 0,9T$; produk operasional disusun (deret waktu, statistik musiman, wave-rose, kurva eksidensi).

Hasil: Lokasi menunjukkan rezim energi rendah-menengah dengan rata-rata $H_s \approx 0,52$ m, $T \approx 4,27$ s, $L \approx 19,2$ m, $c \approx 4,47$ m/s, dan $P \approx 0,66$ kW/m; arah datang didominasi S–SW.

Implikasi: Temuan memandu orientasi deret (S–SW), spacing berbasis L (P50–P90), penalaan PTO di sekitar T median dengan mode tinggi-energi (DJF/SON), dan ambang proteksi menggunakan H_s P90 serta deviasi arah.

Keterbatasan: ERA5 nearshore pada satu grid dan kedalaman tetap; validasi in-situ serta batimetri resolusi tinggi direkomendasikan.

Kata kunci: energi ombak; ERA5; perairan dangkal; dispersi; daya gelombang; wave-rose; Kodingareng Keke

1. Pendahuluan

Transisi energi menuju sistem rendah karbon menuntut diversifikasi sumber berbasis lokal dengan reliabilitas operasional yang memadai. Di wilayah kepulauan Indonesia, energi ombak menawarkan profil pasokan yang stabil dibandingkan angin darat, dan potensial sebagai pelengkap sistem mikrogrid pulau. Walau demikian, performa dan keekonomian konverter energi ombak (Wave Energy Converter/WEC) sangat bergantung pada kesesuaian rancangan dengan karakteristik nearshore setempat. [14][21][33]

Karakterisasi berbasis lepas pantai atau asumsi air-dalam sering gagal merepresentasikan realitas zona transisional/menepi, tempat prototipe dipasang. Transformasi gelombang—shoaling, refraksi, disipasi pecah, serta perubahan arah—mengubah periode dominan, celerity, panjang gelombang, dan distribusi arah. Parameter-parameter ini secara langsung mempengaruhi orientasi, jarak antarmodul (spacing), penalaan power-take-off (PTO), serta kebijakan derating/shutdown. [51][8][34][39][48]

Reanalisis ERA5 menyediakan konsistensi spasio-temporal multi-tahun untuk menilai variabilitas musiman dan antartahun. Dengan mengikat parameter observasional (H_s , T , MWD) pada besaran turunan di kedalaman kerja (L , c) melalui dispersi kedalaman-hingga, kajian nearshore dapat menjaga konsistensi fisik sekaligus relevansi rekayasa. [1][3][38][25]

Literatur mutakhir menekankan dua kebutuhan: (i) produk operasional yang langsung dapat dipakai perancang—deret waktu, wave-rose, statistik musiman, kurva eksidensi—dan (ii) keterpaduan dengan model PTO yang transparan untuk menilai respon mekanik/elektrik terhadap spektrum energi dominan. Keduanya mengurangi bias rancangan dan mempercepat iterasi prototipe. [32][10][11][29][30]

Studi ini menargetkan koridor pemasangan di sisi barat Pulau Kodingareng Keke (Sulawesi Selatan) pada $h = 2,5$ m. Kami menyusun dataset 2019–2025 berbasis ERA5, menurunkan L dan c dari dispersi kedalaman-hingga, serta menghitung P dari kombinasi H_s dan $T \approx 0,9T$. Produk visual diselaraskan dengan keputusan desain/operasi (orientasi S–SW, spacing berbasis $L_{P50-P90}$, dan kalender O&M yang menonjolkan jendela energi DJF/SON). [1][38]

Kontribusi utama naskah ini adalah (i) karakterisasi nearshore multi-tahun dengan parameter turunan yang konsisten secara fisik, (ii) indikator operasional untuk penataan deret, penalaan PTO, dan proteksi berbasis kuantil, serta (iii) pedoman implementatif yang dapat direplikasi untuk lokasi perairan dangkal serupa. [25][38][37][43][46]

Selain menyoroti peluang produksi pada musim energi tinggi, kami menilai keterbatasan data (ERA5 grid tunggal, kedalaman tetap) dan merekomendasikan validasi in-situ (ADCP/buoy) serta batimetri resolusi tinggi guna menekan ketidakpastian, terutama terkait beban ekstrem dan interaksi gelombang-struktur. [15][16]

2. Metode

Data ERA5 (2019–2025) diekstrak untuk variabel tinggi gelombang signifikan (H_s), periode gelombang representatif (T), dan mean wave direction (MWD) pada grid terdekat koridor pemasangan ($h = 2,5$ m). Besaran turunan dihitung sebagai berikut: dispersi

kedalaman-hingga $\omega^2 = gk \cdot \tanh(kh)$ dengan $\omega = 2\pi/T$; panjang gelombang $L = 2\pi/k$; kecepatan rambat fase $c = \omega/k$. Periode energi diaproksimasi $T_e \approx 0,9T$, dan daya gelombang garis dihitung $P = \rho g^2 H_s^2 T_e / (64\pi)$, dilaporkan dalam kW/m (pembagi 1000). [1][38][25]

Pra-proses meliputi penyaringan kualitas, penyamaan satuan (SI), dan penyusunan produk operasional: deret waktu (2019–2025), statistik musiman (DJF/MAM/JJA/SON), wave-rose (16 sektor kompas), dan kurva eksidensi (P_{xx}). Semua grafik dinormalisasi skala dan diberi anotasi untuk konsistensi antar-figur. [38][25]

Validasi tingkat pertama dilakukan melalui pemeriksaan konsistensi fisik (mis. hubungan L–T–c pada kedalaman tetap), serta pemeriksaan silang antar-produk (korelasi Hs–P; perubahan T–L musiman). Validasi in-situ direkomendasikan sebagai pekerjaan lanjutan untuk penajaman parameter ekstrem dan dinamika lokal kecil-skala. [38]

3. Hasil

Dataset ERA5 periode 2019–2025 pada kedalaman kerja $h = 2,5$ m mengindikasikan rezim energi ombak nearshore rendah–menengah dengan metrik ringkas yang konsisten di seluruh tahun: Hs rata-rata $\approx 0,52$ m (P10–P90 $\approx 0,25$ – $0,86$ m), T rata-rata $\approx 4,27$ s (P10–P90 $\approx 3,66$ – $4,93$ s), L rata-rata $\approx 19,18$ m (P10–P90 $\approx 15,82$ – $22,73$ m), c rata-rata $\approx 4,47$ m/s (P10–P90 $\approx 4,33$ – $4,61$ m/s), dan P rata-rata $\approx 0,66$ kW/m (P10–P90 $\approx 0,11$ – $1,46$ kW/m). Konsistensi antar-produk diverifikasi melalui pemeriksaan silang (Hs–P; T–L) dan uji koherensi dispersi pada kedalaman tetap, mengacu pada praktik penilaian sumber daya gelombang berbasis reanalisis yang mapan [1], [3], [38].

Respon musiman tampak jelas: peninggian Hs dan pemanjangan T–L cenderung terjadi pada akhir–awal tahun (DJF/SON), sedangkan MAM relatif melemah. Perubahan ini sejalan dengan dinamika swell regional dan transisi monsun yang terdokumentasi pada kajian wave climate multi-tahun di kawasan lintang menengah–tropis, serta proyeksi iklim gelombang kontemporer [36], [50], [25].

Distribusi probabilistik menunjukkan ekor atas yang moderat namun penting untuk desain. Kuantil Hs P90 $\approx 0,86$ m muncul sebagai ambang praktis untuk kebijakan derating/shutdown, sedangkan rentang tengah (median–P75) mewakili modus operasi harian. Kurva eksidensi P mengonfirmasi bahwa kenaikan energi didorong terutama oleh anomali Hs, konsisten dengan sensitivitas kuadrat $P \propto H_s^2 \cdot T_e$, dan relevan bagi pertimbangan keekonomian (TEA/LCOE) awal [21], [22], [38].

Hubungan L–T–c mengikuti dispersi kedalaman-hingga: ketika T memanjang pada DJF/SON, L turut memanjang, sementara c berfluktuasi sempit akibat faktor $\tanh(kh)$ pada $h = 2,5$ m. Kesesuaian ini memvalidasi konsistensi fisik pemrosesan data serta relevansi penggunaan formulasi air-hingga untuk nearshore, dibanding asumsi air-dalam yang lazim menimbulkan bias rancangan [38], [25].

Karakter arah memperlihatkan dominasi sektor S–SW dengan rerata sirkular $\approx 205^\circ$ dan simpangan baku sirkular $\approx 78^\circ$. Wave-rose 16 sektor menampilkan konsistensi arah pada musim berenergi lebih tinggi dan penyebaran yang lebih lebar pada masa peralihan. Temuan ini selaras dengan literatur mengenai pengaruh kedireksionalan terhadap performa WEC dan pemilihan orientasi array [37], [48].

Daya gelombang garis P mengikuti dinamika Hs dan T: puncak relatif muncul pada DJF/SON, sementara MAM lebih rendah. Integrasi waktu terhadap P menyarankan ‘jendela energi’ pada akhir–awal tahun yang sesuai untuk operasi intensif dan pengujian performa, sedangkan periode energi rendah dimanfaatkan untuk pemeliharaan. Pola ini konsisten dengan kerangka penilaian sumber daya dan implikasi ekonominya [21], [38].

Variasi antar-tahun (2019–2025) menunjukkan stabilitas rezim energi dengan fluktuasi yang berada dalam rentang ketidakpastian reanalisis dan variabilitas iklim antar-musim. Tren global yang dilaporkan pada literatur (misalnya perubahan jangka panjang kecepatan angin/tinggi gelombang) tidak tampak dominan pada skala lokal kajian ini, meski tetap perlu diwaspadai untuk perencanaan jangka panjang [4], [2], [5].

4. Pembahasan

Implikasi desain langsung dari hasil di atas adalah orientasi deret (array) dan konfigurasi mooring yang disejajarkan normal terhadap sektor S–SW untuk memaksimalkan penyerapan energi serta meminimalkan shading antar modul. Jarak antar modul awal direkomendasikan merujuk L pada P50–P90 (≈ 19 – 23 m) untuk menekan interaksi gelombang antar modul, sejalan dengan praktik perancangan array dan evaluasi efek tetangga pada WEC [37], [46], [16].

Penalaan power-take-off (PTO) sebaiknya berpusat pada T median ($\sim 4,23$ s) untuk operasi harian, dengan skenario ‘mode tinggi-energi’ ketika T mendekati kuantil atas pada DJF/SON. Strategi kontrol canggih—misalnya latching/declutching dan model predictive control—dapat meningkatkan penyerapan pada pita frekuensi dominan sambil membatasi beban puncak, sebagaimana dilaporkan pada studi kontrol WEC [29], [11], [30], [32].

Kalender O&M perlu disejajarkan dengan pola musiman: DJF/SON sebagai periode prioritas operasi/produksi dan pengujian kinerja; MAM sebagai jendela pemeliharaan preventif, inspeksi mooring, dan kalibrasi instrumen. Predictability musiman yang memadai dan stabilitas c mendukung penjadwalan yang efisien, sedangkan metrik P50/P90 memberi dasar kebijakan operasional [40], [21], [22].

Dari perspektif keandalan struktural, kuantil atas Hs ($\approx P90$) menjadi ambang awal untuk derating/shutdown. Evaluasi kelelahan (fatigue), clearances, dan beban non-aksial akibat gelombang miring perlu dimasukkan, khususnya saat L memanjang pada DJF/SON. Rekomendasi ini konsisten dengan tinjauan survivability WEC dan rancangan mooring berbasis keandalan [15], [16], [35].

Efek array dan transformasi nearshore—shoaling, refraksi, disipasi—dapat mengubah spektrum lokal, kedireksionalan, serta pola arus dekat dasar. Kajian dampak farm dan pendekatan spektra terarah menekankan perlunya evaluasi numerik/hidrodinamika pada tahap pra-rekayasa agar interaksi antar-perangkat dan perubahan proses pesisir tetap dalam batas yang dapat diterima [34], [48], [25].

Keterbatasan utama studi ini berkaitan dengan representasi nearshore berbasis satu grid ERA5 dan kedalaman efektif tetap 2,5 m. Oleh karena itu, validasi in-situ (ADCP/buoy), survei batimetri resolusi tinggi, serta uji sensitivitas terhadap pemilihan T_e dan parameter PTO sangat disarankan untuk menurunkan ketidakpastian dan mengkalibrasi model terhadap kondisi lokal [1], [38].

Menuju implementasi, hasil karakterisasi dapat dipetakan ke analisis keekonomian (TEA/LCOE) sederhana dengan mengintegrasikan deret waktu P terhadap waktu, mengalikan lebar hadap efektif (capture width) dan efisiensi rantai konversi (η_{chain}). Skema ko-lokasi angin-ombak dan hibridasi dengan PV/microgrid dapat meningkatkan utilisasi aset dan mengurangi variabilitas, sebagaimana ditunjukkan dalam literatur kombinasi sumber terbarukan [21], [22], [23], [28].

5. Kesimpulan

Karakterisasi ERA5 (2019–2025) pada $h = 2,5$ m di sisi barat Kodingareng Keke menunjukkan rezim energi rendah-menengah dengan dominasi arah S–SW. Indikator kunci— $H_s \approx 0,52$ m, $T \approx 4,27$ s, $L \approx 19,18$ m, $c \approx 4,47$ m/s, dan $P \approx 0,66$ kW/m—memberikan dasar operasional untuk orientasi deret, spacing berbasis L , penalaan PTO, serta ambang proteksi. Hasil ini siap dipakai sebagai dasar pra-desain dan perencanaan uji lapangan, dengan catatan validasi in-situ dan batimetri resolusi tinggi diperlukan untuk menurunkan ketidakpastian desain. [1][38][25]

Ucapan Terima Kasih

Penulis berterima kasih kepada penyedia data ERA5 dan pihak institusi yang mendukung studi ini.

Lampiran:

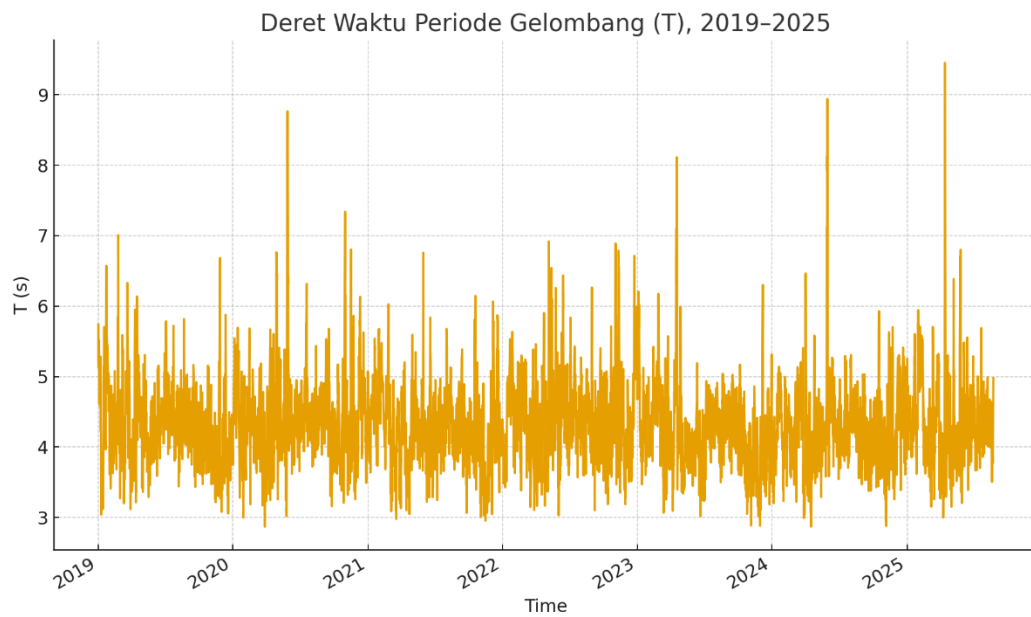


Fig. 1. Deret waktu Periode Gelombang (T), 2019-2025 (placeholder).

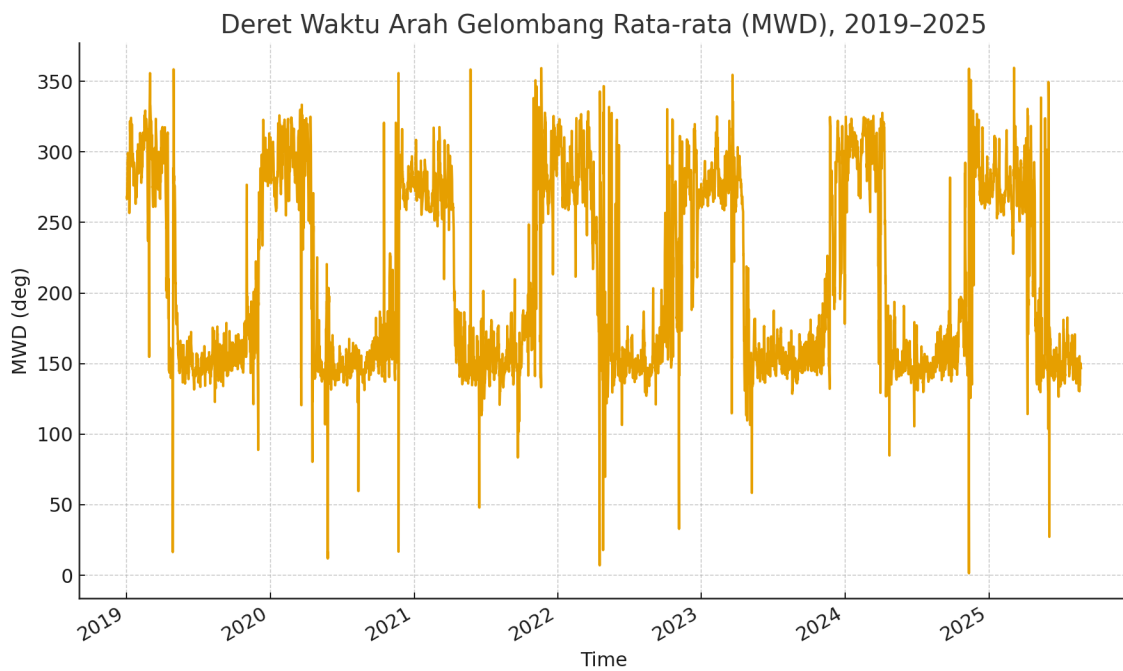


Fig. 2. Deret waktu Arah Gelombang Rata-rata (MWD), 2019-2025 (placeholder).

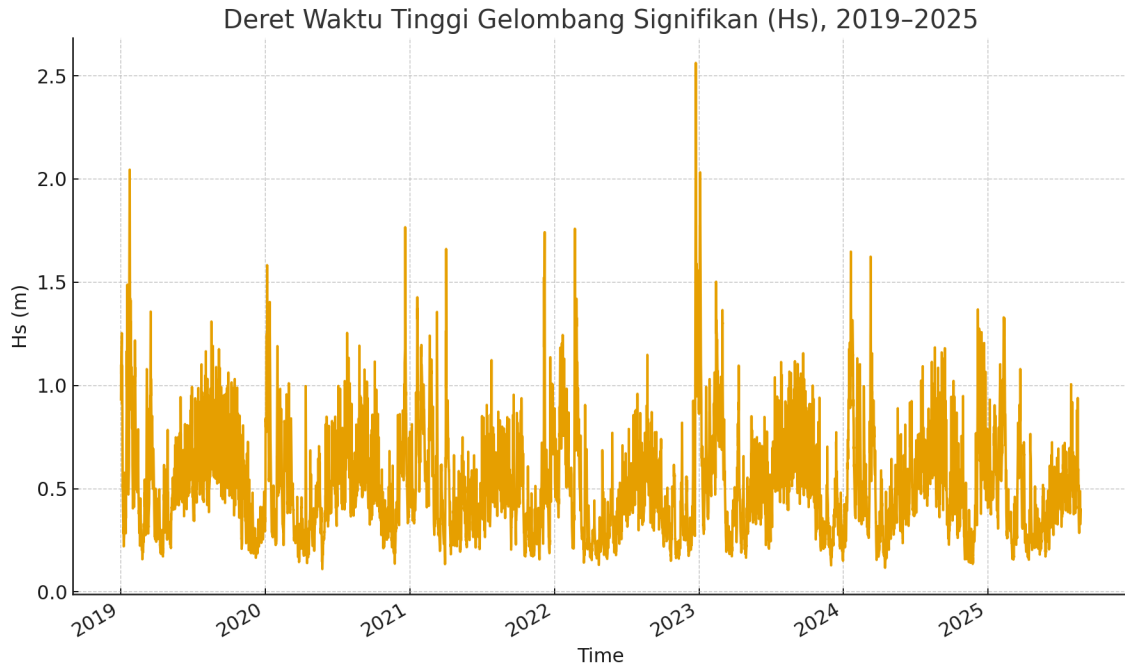


Fig. 3. Deret waktu Tinggi Gelombang Signifikan (Hs), 2019–2025 (placeholder).

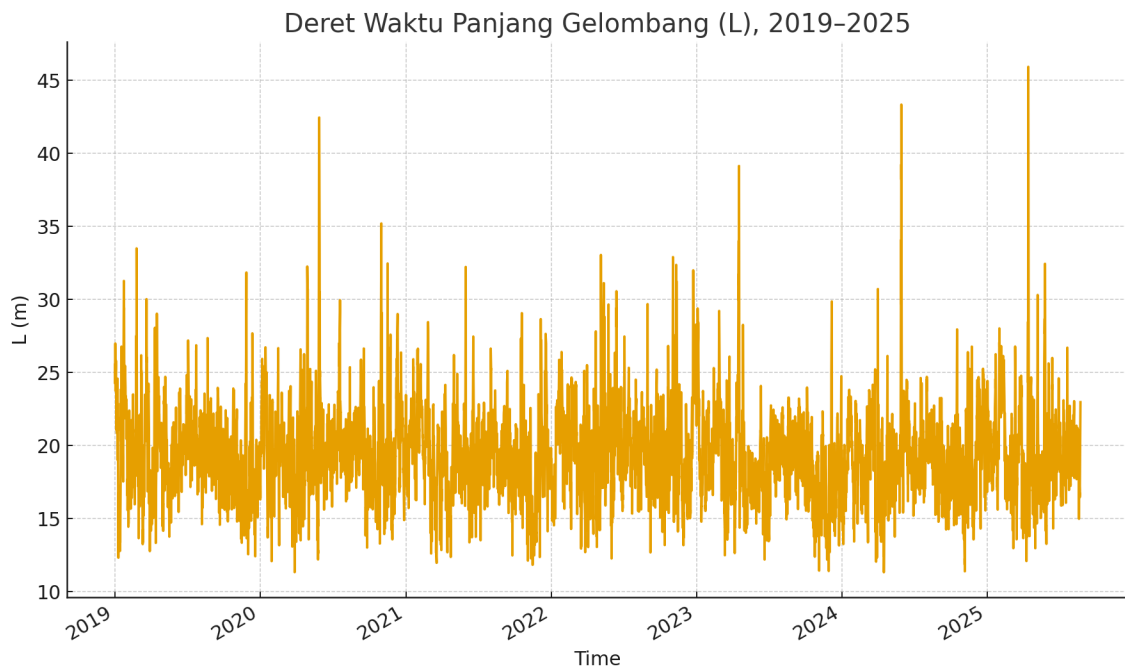


Fig. 4. Deret waktu Panjang Gelombang (L), 2019–2025 (placeholder).

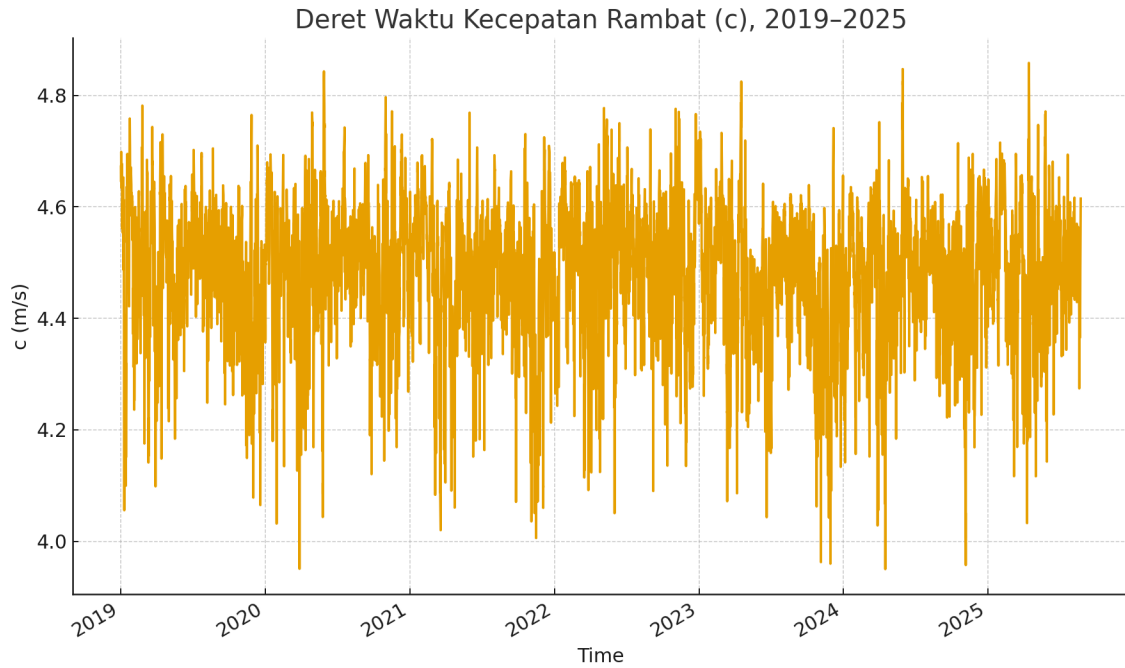


Fig. 5. Deret waktu Kecepatan Rambat Fase (c), 2019–2025 (placeholder).

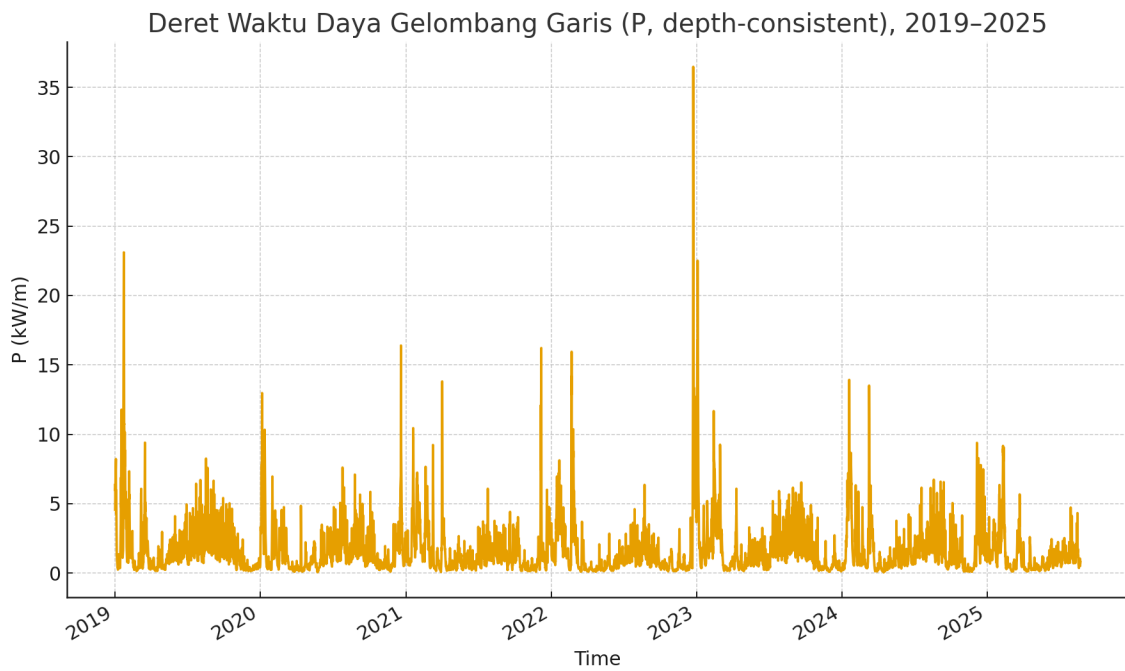


Fig. 6. Deret waktu Daya Gelombang Garis (P), 2019–2025 (placeholder).

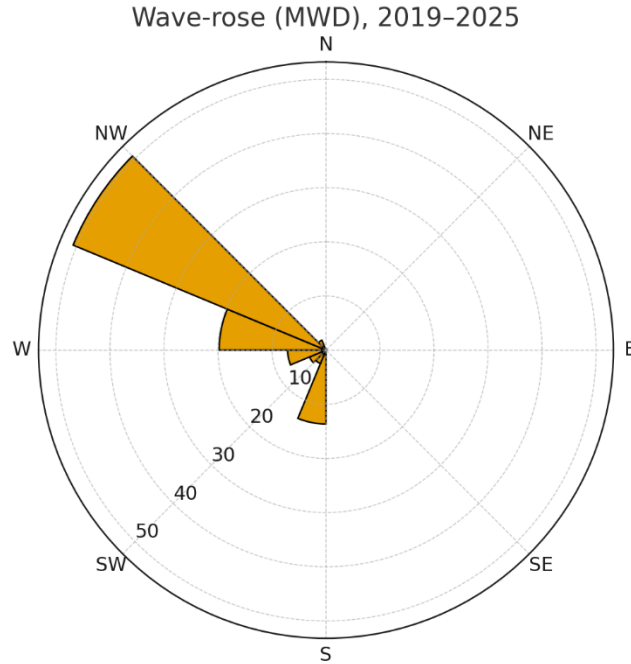


Fig. 7. Wave-rose (16 sektor kompas; N, NNE, ..., NNW) untuk MWD, 2019–2025 (placeholder).

Daftar Pustaka (Format IEEE)

- [1] Hersbach, H., et al. "The ERA5 global reanalysis." *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 146(730), 2020, 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- [2] Morim, J., et al. "Robustness and uncertainties in global multivariate wind–wave climate projections." *Nature Climate Change* 9, 2019, 711–718. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0654-0>
- [3] Morim, J., et al. "A global ensemble of ocean wave climate statistics from contemporary wave reanalysis and hindcasts." *Scientific Data* 7, 2020, 614. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0446-2>
- [4] Young, I.R., & Ribal, A. "Multiplatform evaluation of global trends in wind speed and wave height." *Science* 364(6440), 2019, 548–552. <https://doi.org/10.1126/science.aav9527>
- [5] Meucci, A., et al. "Twenty-First-Century Global Wave Climate Projections Using Shared Socioeconomic Pathways." *Journal of Climate* 36(3), 2023, 737–759. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-21-0929.1>
- [6] Casas-Prat, M., et al. "Projected changes in wave-driven coastal flooding and erosion under climate change." *Journal of Geophysical Research: Oceans* 125(9), 2020, e2019JC015745. <https://doi.org/10.1029/2019JC015745>

- [7] Hemer, M.A., et al. "Projected changes in wave climate from a multi-model ensemble." *Nature Climate Change* 3, 2013, 471–476. <https://doi.org/10.1038/nclimate1791>
- [8] Zanuttigh, B., et al. "An innovative design approach for WECs integrated into coastal structures." *Coastal Engineering* 110, 2016, 36–52. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2016.01.005>
- [9] Iglesias, G., & Carballo, R. "Wave energy and nearshore hot spots: the Gulf of Cádiz." *Renewable Energy* 57, 2013, 312–321. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.01.024>
- [10] Penalba, M., & Ringwood, J. "Nonlinear approaches for WEC modelling: A review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 54, 2016, 881–896. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.133>
- [11] Panzeri, A., et al. "Model Predictive Control of Wave Energy Converters: A Review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 81, 2018, 274–287. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.07.033>
- [12] Hals, J., Falnes, J., & Moan, T. "A comparison of selected strategies for adaptive control of WECs." *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering* 133(3), 2011, 031101. <https://doi.org/10.1115/1.4002731>
- [13] Guo, B., et al. "Wave energy converters: Technologies, challenges and opportunities." *IET Renewable Power Generation* 15(11), 2021, 2451–2470. <https://doi.org/10.1049/rpg2.12302>
- [14] Borthwick, A.G.L. "Marine renewable energy seascape." *Engineering* 2(1), 2016, 69–78. <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2016.01.011>
- [15] Wei, Y., et al. "Survivability and reliability of wave energy converters: A review." *Renewable Energy* 127, 2018, 646–661. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.05.007>
- [16] Thies, P.R., et al. "Mooring system design for wave energy converters: A review." *Ocean Engineering* 117, 2016, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2016.02.016>
- [17] Babarit, A. "A database of wave energy converters." *Ocean Engineering* 72, 2013, 77–87. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2012.01.025>
- [18] Aderinto, T., & Li, H. "Review on power performance and efficiency of wave energy converters." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 79, 2017, 140–150. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.063>
- [19] Astariz, S., & Iglesias, G. "The economics of wave energy: A review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 45, 2015, 397–408. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.061>

- [20] Lavidas, G., & Venugopal, V. "Wave climate change and its impacts on wave energy potential in the North Sea." *Renewable Energy* 52, 2013, 240–248.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.10.013>
- [21] Vicente, M., et al. "Techno-economic assessment of wave energy: A review." *Energy Conversion and Management* 209, 2020, 112654.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112654>
- [22] Chang, G., et al. "Factors affecting the LCOE of wave energy conversion." *Renewable Energy* 127, 2018, 344–354. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.04.039>
- [23] Perez-Collazo, C., Greaves, D., & Iglesias, G. "A review of combined wind–wave energy." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 42, 2015, 141–153.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.079>
- [24] Magagna, D., & Uihlein, A. "Ocean energy development in Europe." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 49, 2015, 1013–1021.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.050>
- [25] Maillet, J., et al. "Offshore and nearshore wave energy resource assessment." *Renewable Energy* 57, 2013, 706–718. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.01.036>
- [26] Mendes, M.J., et al. "Wave energy in Portugal: Resource, technologies and pilot projects." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 74, 2017, 1305–1324.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.028>
- [27] Rusu, L., & Onea, F. "A review of the methodologies for wave energy assessment in the Black Sea." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 46, 2015, 31–39.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.046>
- [28] Reikard, G., Robertson, B., & Bidlot, J.R. "Combining wave energy with wind and solar." *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 41(2), 2016, 281–291.
<https://doi.org/10.1109/JOE.2015.2432991>
- [29] Di Lauro, F., et al. "Optimized latching control for WECs." *IEEE Transactions on Sustainable Energy* 9(1), 2018, 143–151.
<https://doi.org/10.1109/TSTE.2017.2700924>
- [30] Bacelli, G., & Ringwood, J. "Control-oriented modelling for wave energy devices." *Control Engineering Practice* 53, 2016, 133–143.
<https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2016.04.001>
- [31] Korpela, J., et al. "On the control of wave energy converters under irregular seas." *Applied Energy* 204, 2017, 1175–1189.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.025>

- [32] Sheng, W., et al. "A review of power take-off systems for wave energy." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 79, 2017, 839–852.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.096>
- [33] Pecher, A., & Kofoed, J.P. "Ocean Wave Energy: Current Status and Future Perspectives." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 79, 2017, 649–660.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.081>
- [34] Clemente, D., et al. "Wave farm impact on nearshore processes: A review." *Ocean Engineering* 204, 2020, 107248. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107248>
- [35] Naderi, M., et al. "Reliability-based design for WEC moorings." *Ocean Engineering* 220, 2021, 108439. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108439>
- [36] Rusu, E., & Rusu, L. "Evaluation of wave energy resources in the North Atlantic." *Energy* 235, 2021, 121351. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121351>
- [37] Iglesias, G., et al. "Wave directionality and WEC performance." *Energy* 173, 2019, 1181–1193. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.02.136>
- [38] Coe, R.G., & Neary, V.S. "Review of methods for wave energy resource assessment." *Renewable Energy* 114, 2017, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.12.035>
- [39] Guillou, N., & Chapalain, G. "Wave climate projections for the Bay of Biscay." *Ocean Engineering* 148, 2018, 322–335. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.11.027>
- [40] Neill, S.P., & Hashemi, M.R. "Wave power variability and predictability." *Applied Energy* 132, 2014, 178–190. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.06.021>
- [41] Lewis, A., et al. "Ocean energy." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14(3), 2010, 899–918. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.08.003>
- [42] Rusu, L. "Wave energy assessments in the Black Sea." *Renewable Energy* 36(3), 2011, 897–904. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.07.015>
- [43] Gallagher, S., et al. "Operational wave energy converter arrays." *Renewable Energy* 127, 2018, 1077–1091. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.05.038>
- [44] Hiles, C.E., et al. "Levelized cost of energy for wave energy." *Renewable Energy* 139, 2019, 37–46. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.02.077>
- [45] López, I., et al. "Control strategies for wave energy converters." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 42, 2015, 871–884.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.079>
- [46] O'Boyle, L., et al. "Techno-economic optimization of WEC arrays." *Renewable Energy* 141, 2019, 728–743. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.04.108>

- [47] Rahm, M., et al. "Wave energy converter performance in the Baltic Sea." *Renewable Energy* 97, 2016, 440–448. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.05.073>
- [48] Konstantinou, A., et al. "Directional wave spectra and implications for WECs." *Ocean Engineering* 199, 2020, 107036. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107036>
- [49] Ponce de León, S., & Guedes Soares, C. "Wave energy resource variability." *Renewable Energy* 114, 2017, 1363–1377. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.07.074>
- [50] Guillou, N., et al. "Future changes in wave energy along European coasts." *Renewable Energy* 145, 2020, 1003–1018. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.069>
- [51] Silva, R., et al. "Wave climate and coastal hazards under climate change." *Coastal Engineering* 150, 2019, 87–104. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2019.04.005>
- [52] Reguero, B.G., et al. "Global wave power: spatial patterns and long-term trends." *Nature Communications* 10, 2019, 205. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-08066-0>