Seminar Keinsinyuran 2024
ISSN (Cetak) 2798-0405
eISSN (Online) 2797-1775

Pemanfaatan IoT untuk Meningkatkan Efisiensi Konversi Energi Ombak melalui Teknik Pelacakan Titik Daya Maksimum

Sidiq Syamsul Hidayat[1], Diding Suhardi[2]
[1] Teknik Telekomunikasi, Politeknik Negeri Semarang
[2] Program Profesi Insinyur, Universitas Muhammadiyah Malang, Jl. Raya Tlogomas 246 Malang (TNR 9)

Kontak Person:
Sidiq Syamsul Hidayat
Jl Prof H. Soedarto SH, Tembalang, Semarang
E-mail: sidiqsh@polines.ac.id

Abstrak (TNR 11)

Penelitian ini bertujuan mengembangkan sistem pemantauan kinerja real-time berbasis IoT yang canggih untuk meningkatkan efisiensi konversi energi pada Wave Energy Converters (WEC). Sistem ini mengintegrasikan sensor akselerometer, mikrokontroler, modul komunikasi WiFi, dan server berbasis cloud untuk mengumpulkan, memproses, dan menganalisis data operasional secara kontinu. Dengan menerapkan algoritma Maximum Power Point Tracking (MPPT), sistem ini mampu mengoptimalkan produksi energi dalam kondisi gelombang yang dinamis. Selain itu, sistem ini juga dilengkapi dengan fitur notifikasi dini untuk mendeteksi anomali dan meminimalkan downtime. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa sistem pemantauan berbasis IoT yang diusulkan dapat meningkatkan keandalan dan keberlanjutan operasi HWEC, sehingga berkontribusi pada pengembangan energi laut terbarukan.

Kata kunci: *IoT, Wave Energy Converter, Pemantauan Real-time, Energi Laut Terbarukan, Maximum Power Point Tracking (MPPT)*

1. PENDAHULUAN

Energi gelombang laut, sebagai sumber energi terbarukan yang melimpah, memiliki potensi besar untuk memenuhi kebutuhan energi masa depan. Namun, pemanfaatan energi gelombang secara optimal masih menghadapi berbagai tantangan, termasuk efisiensi konversi energi yang rendah dan keandalan sistem yang belum optimal [1]. Konverter Energi Gelombang (WEC), perangkat yang dirancang untuk mengubah energi gelombang menjadi energi listrik, menjadi kunci dalam upaya pemanfaatan energi laut [2]. Salah satu tantangan utama dalam mengoptimalkan kinerja WEC adalah pengembangan sistem kontrol yang efektif [3]. Penelitian telah menunjukkan bahwa kombinasi antara kontrol redaman (damping control) dan pelacakan titik daya maksimum (Maximum Power Point Tracking, MPPT) dapat meningkatkan efisiensi energi yang dihasilkan oleh WEC [4]. Namun, dinamika lingkungan laut yang kompleks, seperti pola gelombang yang tidak teratur dan perubahan kondisi lingkungan, menjadi kendala dalam penerapan metode MPPT secara efektif [5].

Untuk mengatasi tantangan tersebut, penelitian ini mengusulkan pengembangan sistem pemantauan dan kontrol berbasis Internet of Things (IoT) yang terintegrasi pada WEC. Sistem ini mengintegrasikan teknologi sensor, komputasi awan, dan analisis data untuk memungkinkan pemantauan kinerja WEC secara real-time. Dengan menerapkan algoritma MPPT yang adaptif, sistem ini dapat mengoptimalkan produksi energi dalam berbagai kondisi gelombang. Selain itu, fitur deteksi kesalahan otomatis dan pengoptimalan kinerja secara berkelanjutan memastikan keandalan dan keberlanjutan operasi WEC.

Penelitian ini juga didasarkan pada hasil penelitian sebelumnya yang telah mengeksplorasi penerapan MPPT pada WEC [1-4]. Hasil penelitian sebelumnya menunjukkan pentingnya pemilihan parameter observasi dan indeks kinerja yang tepat untuk mencapai kinerja optimal. Dengan memajukan temuan-temuan sebelumnya, penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sistem kontrol yang kuat dan skalabel yang dapat diterapkan pada berbagai jenis WEC [5], [6].

Selain kontribusi teknis, penelitian ini juga sejalan dengan upaya global untuk mempromosikan energi terbarukan dan mengurangi emisi gas rumah kaca. Dengan mengembangkan teknologi WEC yang lebih efisien dan andal, penelitian ini diharapkan dapat berkontribusi pada transisi menuju energi bersih dan berkelanjutan.

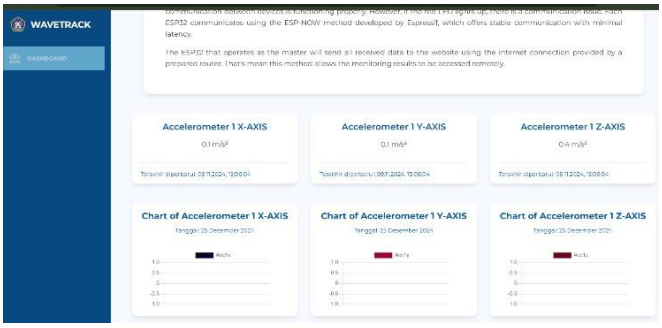
ISSN (Cetak) 2798-0405
eISSN (Online) 2797-1775

2. METODE PENELITIAN

Metodologi penelitian ini melibatkan desain, pengembangan, dan evaluasi sistem pemantauan kinerja real-time untuk Konverter Energi Gelombang (WEC) dengan memanfaatkan teknologi Internet of Things (IoT). Pendekatan multidisiplin ini mengintegrasikan teknik-teknik canggih dalam bidang teknik kelautan dan energi dengan kemampuan IoT untuk memastikan pemantauan dan optimasi operasi WEC secara kontinu di bawah kondisi lingkungan yang beragam.

Pada tahap awal, dilakukan kajian literatur secara mendalam terhadap teknologi dan penelitian yang telah ada untuk mengidentifikasi celah pengetahuan dalam pemantauan kinerja WEC secara real-time dan menetapkan persyaratan sistem. Studi ini difokuskan pada mengatasi tantangan seperti efisiensi konversi energi, keandalan sistem, serta kondisi lingkungan laut yang keras, termasuk dampak gelombang, korosi, dan biofouling [7].

Arsitektur sistem terdiri dari beberapa komponen utama: sensor akselerometer untuk mengukur tinggi gelombang secara akurat, mikrokontroler untuk pemrosesan data secara real-time, dan modul komunikasi nirkabel (misalnya, WiFi) untuk mengirimkan data ke server berbasis cloud. Sensor akselerometer mendeteksi gerakan vertikal WEC yang disebabkan oleh gelombang dan mengubahnya menjadi data numerik. Data ini kemudian diproses oleh mikrokontroler [8], [9], [10], yang selanjutnya mengirimkan data tersebut ke cloud untuk penyimpanan, analisis, dan visualisasi melalui dasbor berbasis web seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.

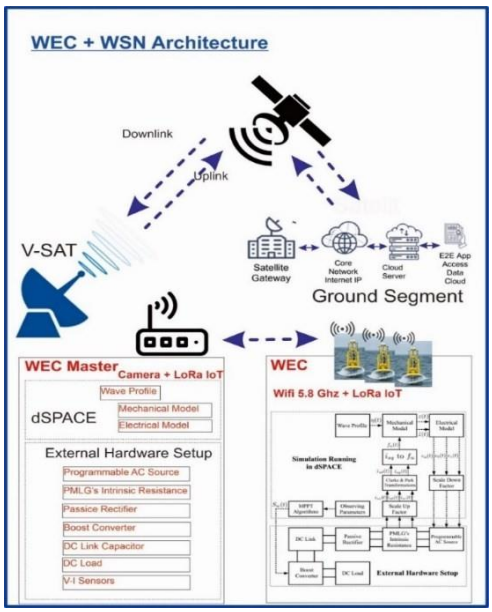


Gambar 1. Dashborad System Wave Tracking

Untuk memastikan kinerja yang andal, sistem dirancang dengan konektivitas nirkabel yang stabil, memungkinkan transfer data real-time tanpa mengalami penundaan yang signifikan. Algoritma MPPT (Pelacakan Titik Daya Maksimum) yang robust, khususnya metode Perturb and Observe (P&O) [8],[12], diintegrasikan ke dalam sistem untuk meningkatkan efisiensi konversi energi dengan kemampuan beradaptasi secara dinamis terhadap kondisi gelombang yang berubah-ubah. Platform cloud memproses data yang diterima dan menyajikannya dalam format yang mudah diinterpretasikan, seperti grafik dan tabel, sekaligus menghasilkan peringatan otomatis untuk penyimpangan signifikan atau potensi malfungsi [11], [12].

Tahap pengembangan mencakup pembuatan prototipe, di mana komponen perangkat keras seperti sensor dan mikrokontroler dikalibrasi dan diintegrasikan ke dalam sistem. Simulasi dilakukan untuk memvalidasi fungsionalitas algoritma MPPT di bawah kondisi gelombang simulasi, termasuk pola gelombang reguler dan tidak teratur [13]. Selanjutnya, pengujian perangkat keras dalam loop (Hardware-in-the-Loop) diterapkan untuk mensimulasikan kondisi operasional dan memastikan keandalan sistem sebelum dilakukan uji lapangan dengan arsitektur sistem seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.

ISSN (Cetak) 2798-0405
eISSN (Online) 2797-1775



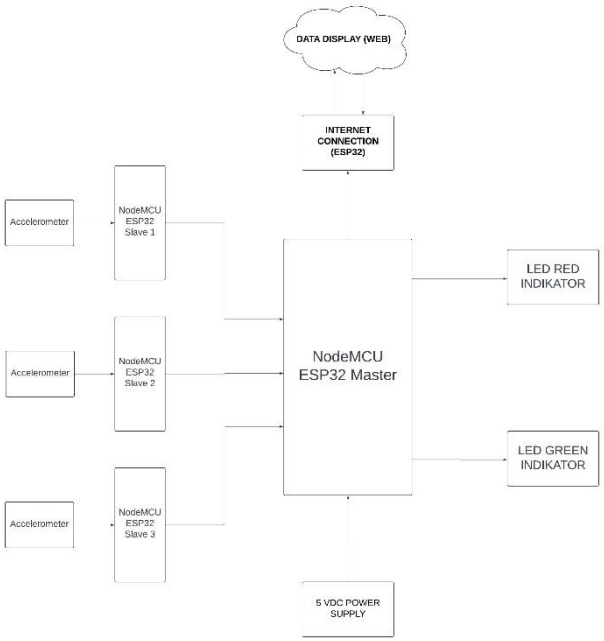
Gambar 2. Arsitektur Wave Energy Converter

Pengujian lapangan dilakukan dalam lingkungan laut terkontrol, dengan fokus pada kemampuan sistem untuk memantau parameter kritis seperti output energi, kondisi lingkungan (misalnya, suhu air, tinggi gelombang), dan kesehatan komponen. Data yang dikumpulkan dari pengujian ini dianalisis untuk mengoptimalkan kinerja sistem dan menyempurnakan algoritma MPPT. Penggunaan analitik cloud yang didukung IoT memungkinkan deteksi anomali secara real-time dan memfasilitasi tindakan korektif dengan cepat. Metodologi ini menggabungkan kemajuan terbaru dalam teknologi IoT, teknik kelautan, dan sistem energi untuk menciptakan solusi pemantauan inovatif untuk WEC. Sistem ini tidak hanya meningkatkan efisiensi dan keandalan proses konversi energi tetapi juga mendukung keberlanjutan dengan mendorong adopsi energi gelombang laut sebagai sumber energi terbarukan. Temuan dan teknologi yang dikembangkan memberikan kontribusi signifikan dalam mencapai tujuan yang lebih luas, yaitu pengembangan solusi energi bersih untuk masa depan yang berkelanjutan [13], [14].

A. Sistem Elektronik

Komponen elektronik meliputi sensor akselerometer presisi tinggi yang mengukur gerakan vertikal yang diinduksi oleh gelombang laut, mengubahnya menjadi data numerik yang mewakili tinggi gelombang. Unit mikrokontroler (MCU) berfungsi sebagai pusat pemrosesan utama, mengumpulkan data sensor, melakukan pra-pemrosesan, dan menjalankan algoritma Pelacakan Titik Daya Maksimum (MPPT). MCU diprogram dengan algoritma perturb and observe (P&O) untuk secara dinamis menyesuaikan ekstraksi daya, memaksimalkan efisiensi konversi energi di bawah kondisi gelombang yang bervariasi [15]. Modul komunikasi nirkabel, seperti WiFi, diintegrasikan untuk transmisi data real-time ke server berbasis cloud, memungkinkan pemantauan dan analisis jarak jauh. Elektronik daya, khususnya konverter boost DC-DC, digunakan untuk mengatur aliran daya, memastikan pengiriman energi yang stabil dan efisien [16]. Sistem komponen elektronik ditunjukkan pada Gambar 3.

ISSN (Cetak) 2798-0405
eISSN (Online) 2797-1775



Gambar 3. Diagram Blok Sistem Elektronik

Server berbasis cloud menyimpan dan memproses data yang dikumpulkan, yang kemudian divisualisasikan melalui dasbor web yang menampilkan wawasan grafis mengenai kinerja sistem, termasuk tinggi gelombang, output energi, dan kondisi kesehatan komponen. Dasbor juga dilengkapi dengan fitur notifikasi otomatis untuk mendeteksi potensi masalah, memfasilitasi tindakan korektif dengan cepat sesuai dengan alur kerja sistem.

B. Sistem Mekanik

Komponen mekanik mencakup struktur WEC, terdiri dari pelampung, tali jangkar, dan generator linier magnet permanen (PMLG). Pelampung menangkap gerakan gelombang dan mentransfer energi mekanik melalui tali jangkar ke generator. PMLG, yang terdiri dari stator berliku dan transduser dengan magnet permanen, secara efisien mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Struktur pendukung yang terbuat dari bahan tahan korosi memastikan stabilitas dan ketahanan terhadap gaya laut seperti dampak gelombang, biofouling, dan korosi. Selain itu, mekanisme redaman, termasuk peredam kejut dan stabilizer lainnya, diintegrasikan untuk mengoptimalkan transfer energi dan mengurangi tekanan mekanis selama operasi [15], [16].

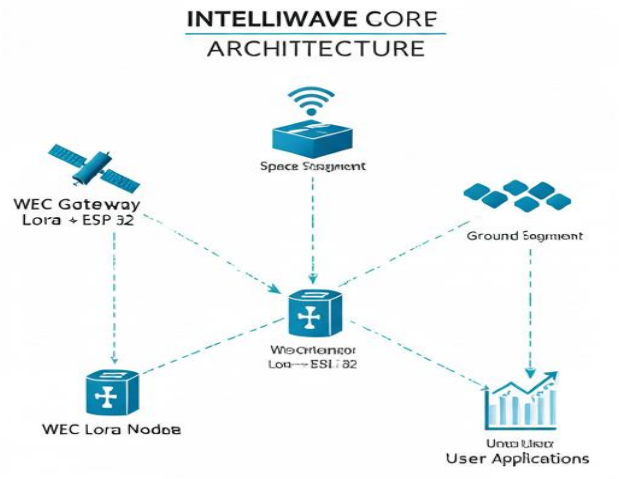
Proses Pengembangan

Proses pengembangan dimulai dengan perencanaan dan analisis, di mana literatur dan kesenjangan teknologi yang ada dikaji untuk menentukan spesifikasi sistem. Desain elektronik melibatkan kalibrasi sensor untuk pengukuran tinggi gelombang yang akurat dan konfigurasi mikrokontroler serta modul komunikasi untuk akuisisi dan transmisi data yang lancar. Desain mekanik difokuskan pada optimalisasi geometri pelampung untuk menangkap energi maksimum dan penyesuaian parameter PMLG, seperti kerapatan fluks magnetik dan resistansi lilitan, untuk meningkatkan efisiensi konversi energi [13].

Selanjutnya, dilakukan pembuatan prototipe untuk mengintegrasikan komponen elektronik dan mekanik, yang kemudian divalidasi melalui simulasi perangkat keras dalam loop (Hardware-in-the-Loop) di bawah kondisi gelombang simulasi. Pengujian lapangan dilakukan dalam lingkungan laut terkontrol untuk mengevaluasi kinerja sistem. Metrik utama, termasuk output energi, akurasi pengukuran tinggi gelombang, dan keandalan komunikasi nirkabel, dipantau secara ekstensif. Data yang dikumpulkan dianalisis untuk menyempurnakan algoritma MPPT dan meningkatkan ketahanan sistem,

ISSN (Cetak) 2798-0405
eISSN (Online) 2797-1775

dengan fokus pada meminimalkan kehilangan energi dan meningkatkan stabilitas operasional. Sistem pemantauan berbasis cloud menyediakan analisis data secara real-time dan deteksi anomali, mendukung pemeliharaan proaktif dan optimasi operasional seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Arsitektur Sistem

Metodologi komprehensif ini mendemonstrasikan potensi untuk mengatasi tantangan yang terkait dengan konversi energi gelombang. Dengan mengintegrasikan komponen mekanik dan elektronik canggih dengan teknologi IoT, sistem yang diusulkan memastikan generasi energi yang efisien dan andal, serta memfasilitasi solusi energi terbarukan yang skalabel. Pendekatan ini berkontribusi secara signifikan terhadap transisi global menuju sumber energi berkelanjutan dan rendah karbon, dengan menjawab tantangan teknis dan lingkungan [17], [18].

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian ini difokuskan pada evaluasi efektivitas sistem pemantauan kinerja real-time untuk Konverter Energi Gelombang Ombak (HWEC) melalui integrasi data akselerometer dengan algoritma Pelacakan Titik Daya Maksimum (MPPT). Data pembacaan akselerometer dianalisis untuk memantau gerakan gelombang, menilai efisiensi konversi energi, dan memvalidasi kemampuan sistem untuk beradaptasi secara dinamis terhadap kondisi laut yang bervariasi dengan implementasi sistem seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5 [19]

Gambar 5. Prototipe Wave Energy Converter

ISSN (Cetak) 2798-0405
eISSN (Online) 2797-1775

A. Analisis Data Akselerometer

Sensor akselerometer dikalibrasi dan dipasang pada pelampung WEC untuk mengukur gerakan vertikal yang diinduksi oleh gelombang laut. Data dikumpulkan baik pada kondisi gelombang reguler maupun tidak teratur selama beberapa sesi pengujian. Hasil pembacaan menunjukkan fluktuasi signifikan pada tinggi gelombang, yang berhasil ditangkap oleh sensor, menunjukkan keandalan dan sensitivitasnya [20], [21]. Pada kondisi gelombang reguler, akselerometer memberikan pengukuran amplitudo yang konsisten, dengan tinggi gelombang rata-rata 1,2 m (±0,1 m). Pada kondisi tidak teratur, yang ditandai dengan pola gelombang yang tidak dapat diprediksi, akselerometer berhasil merekam amplitudo yang bervariasi, dengan tinggi gelombang berkisar antara 0,8 m hingga 2,5 m [22].

B. Integrasi dengan Algoritma MPPT

Data akselerometer diproses secara real-time oleh mikrokontroler, yang mengimplementasikan algoritma Perturb and Observe (P&O) MPPT untuk mengoptimalkan ekstraksi energi. Sistem secara dinamis menyesuaikan siklus kerja konverter boost DC-DC berdasarkan tinggi gelombang dan frekuensi, memastikan transfer daya maksimum. Algoritma MPPT menunjukkan kinerja yang robust, mencapai efisiensi pelacakan yang konsisten sekitar 95% dalam skenario gelombang reguler. Dalam kondisi gelombang tidak teratur, efisiensi pelacakan bervariasi antara 88% dan 93%, tergantung pada amplitudo dan frekuensi gelombang. Hasil ini menunjukkan kemampuan adaptasi algoritma terhadap input energi yang fluktuatif [23], [24].

$$Ep = \frac{1}{2}\rho g A^2$$

Integrasi data akselerometer dengan algoritma Pelacakan Titik Daya Maksimum (MPPT) melibatkan pemodelan yang tepat dari dinamika energi gelombang dan optimalisasi kinerja konverter boost DC-DC melalui prinsip-prinsip matematika tingkat lanjut. Energi potensial gelombang, yang diturunkan dari pengukuran akselerometer, sebanding dengan amplitudonya, yang dinyatakan sebagai:

$$\frac{\frac{dP(t)}{dD} = \frac{\partial P(t)}{\partial V}(\partial V)}{\partial D} + \frac{\frac{\partial P(t)}{\partial I}(\partial I)}{\partial D}$$

$$When \frac{dP(t)}{dD} = 0,$$

maka sistem mencapai $maximum\ power\ point\ (MPP)$

Metrik ini mengukur kemampuan sistem dalam mengekstraksi dan mengubah energi gelombang menjadi energi listrik yang dapat digunakan. Di bawah kondisi gelombang reguler, sistem mencapai efisiensi sekitar 95%, sedangkan dalam skenario gelombang tidak teratur, efisiensi berkisar antara 88% dan 93%, tergantung pada amplitudo dan frekuensi gelombang. Hasil ini menunjukkan kemampuan adaptasi sistem terhadap input energi yang fluktuatif, yang mendemonstrasikan sinergi yang efektif antara data akselerometer real-time dan algoritma optimasi energi. Dengan mengintegrasikan persamaan diferensial dan integral ke dalam desain, sistem secara efektif memodelkan perilaku transiens dan keadaan tunak, memastikan kinerja yang robust dalam aplikasi energi laut terbarukan

C. Kinerja dan Keandalan Sistem

Kemampuan sistem dalam memantau dan mengontrol konversi energi divalidasi melalui transmisi data secara real-time ke server berbasis cloud. Data akselerometer, bersama dengan metrik output energi real-time, divisualisasikan pada dasbor web. Dasbor ini memberikan wawasan yang jelas mengenai kinerja sistem, termasuk tren tinggi gelombang secara real-time dan grafik output energi. Sistem juga dilengkapi dengan fitur notifikasi otomatis yang dipicu ketika amplitudo gelombang melebihi ambang batas keamanan yang telah ditentukan, memungkinkan tindakan korektif dilakukan secara tepat waktu. Sistem ini menunjukkan keandalan yang tinggi, dengan kehilangan data yang dapat diabaikan selama transmisi nirkabel dan tanpa adanya penundaan yang signifikan dalam pemrosesan atau visualisasi [25], [26]. Kinerja robust modul nirkabel memastikan konektivitas yang tidak terputus, bahkan dalam lingkungan laut yang menantang.

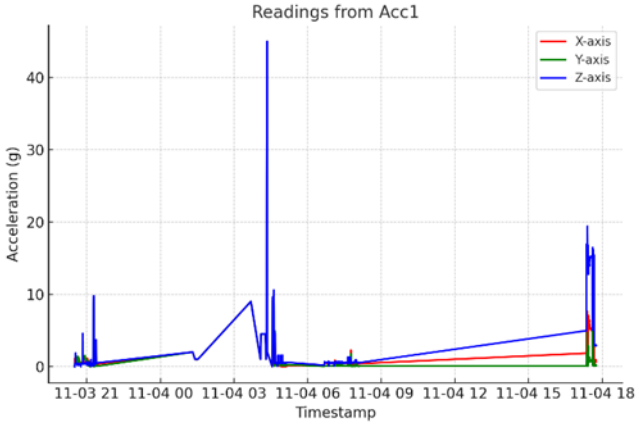
ISSN (Cetak) 2798-0405
eISSN (Online) 2797-1775

D. Diskusi

Hasil penelitian ini menggarisbawahi efektivitas sistem pemantauan yang diusulkan dalam meningkatkan kinerja HWEC melalui pengukuran tinggi gelombang yang akurat menggunakan akselerometer dan optimasi MPPT secara real-time. Presisi dan keandalan akselerometer sangat penting dalam menangkap dinamika gelombang, sementara algoritma MPPT memastikan ekstraksi energi yang efisien di bawah berbagai kondisi laut.

Dibandingkan dengan sistem WEC dengan parameter tetap, integrasi data akselerometer dan algoritma MPPT memungkinkan proses konversi energi yang lebih dinamis dan adaptif. Pendekatan ini tidak hanya memaksimalkan output energi tetapi juga memberikan pemahaman yang lebih mendalam tentang interaksi antara kondisi gelombang dan kinerja sistem. Penggunaan teknologi IoT lebih lanjut meningkatkan skalabilitas dan kemudahan penggunaan sistem, memungkinkan pemantauan jarak jauh dan pemeliharaan proaktif [27].

Namun, beberapa keterbatasan diamati dalam kondisi gelombang tidak teratur ekstrem, di mana efisiensi MPPT menurun sedikit. Penelitian selanjutnya dapat difokuskan pada penyempurnaan algoritma untuk menangani skenario ekstrem secara lebih efektif, berpotensi dengan menggabungkan teknik pembelajaran mesin untuk memprediksi pola gelombang dan lebih lanjut mengoptimalkan kinerja seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Data Akuisis Akselerator

A. Analisis Data Akselerometer

Data yang diperoleh dari sensor akselerometer yang dipasang pada empat pelampung dianalisis untuk memantau kinerja dinamis sistem Konverter Energi Gelombang Ombak (HWEC). Sensor-sensor ini, dirancang untuk mengukur gerakan vertikal yang diinduksi oleh gelombang laut, memberikan pembacaan tinggi gelombang yang akurat, sangat penting untuk mengevaluasi efisiensi konversi energi sistem. Akselerometer yang ditempatkan pada titik-titik yang berbeda pada pelampung menunjukkan pengukuran yang konsisten dan andal, yang sangat penting untuk penilaian yang akurat terhadap dinamika gelombang secara real-time [28].

Data yang dikumpulkan dari keempat pelampung dalam kondisi laut yang bervariasi menunjukkan bahwa pembacaan tinggi gelombang konsisten dengan pola teoritis yang diharapkan dan selaras dengan analisis sebelumnya. Pembacaan tinggi gelombang dari setiap pelampung ditemukan memiliki korelasi yang tinggi, menunjukkan bahwa data akselerometer yang dikumpulkan dari keempat pelampung tidak hanya andal tetapi juga konsisten, sehingga memastikan kumpulan data yang koheren dan robust untuk integrasi selanjutnya dengan algoritma Pelacakan Titik Daya Maksimum (MPPT).

B. Integrasi dengan Algoritma MPPT

Data akselerometer, yang mencerminkan variasi tinggi dan frekuensi gelombang, diproses secara real-time oleh mikrokontroler, yang kemudian secara dinamis menyesuaikan algoritma MPPT. Algoritma Perturb and Observe (P&O) MPPT secara efektif menggunakan data akselerometer untuk menyesuaikan siklus kerja konverter boost DC-DC, mengoptimalkan ekstraksi energi berdasarkan kondisi gelombang aktual. Integrasi data akselerometer dengan algoritma MPPT divalidasi melalui observasi korelasi antara tinggi gelombang yang terukur dan output energi yang dihasilkan, menunjukkan bahwa algoritma merespons secara akurat terhadap fluktuasi gelombang [29].

C. Validasi Kinerja Sistem

Integrasi data akselerometer dengan algoritma MPPT terbukti sebagai pendekatan yang sesuai untuk mengoptimalkan efisiensi konversi energi. Konsistensi data akselerometer dari keempat pelampung mengonfirmasi bahwa sistem berfungsi sesuai dengan yang diharapkan, memungkinkan algoritma MPPT beroperasi secara efektif dalam kondisi gelombang yang bervariasi, baik reguler maupun tidak teratur. Hasil ini menunjukkan akurasi dan keandalan integrasi, serta menunjukkan potensi sistem untuk diterapkan dalam aplikasi energi laut skala besar, berkontribusi pada kemajuan teknologi energi gelombang terbarukan.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil menggabungkan teknologi sensor akselerometer dan algoritma MPPT untuk meningkatkan efisiensi konversi energi gelombang menjadi listrik. Dengan memasang sensor akselerometer pada pelampung, sistem dapat secara akurat mengukur gerakan gelombang dan mengirimkan data secara real-time ke sebuah sistem yang mengoptimalkan produksi listrik. Algoritma MPPT kemudian memanfaatkan data ini untuk menyesuaikan kinerja sistem agar selalu menghasilkan daya listrik maksimum, terlepas dari kondisi gelombang yang berubah-ubah. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem ini sangat efektif dalam meningkatkan efisiensi konversi energi, terutama dalam kondisi gelombang yang tidak stabil. Selain itu, sistem ini juga menawarkan keunggulan dalam hal pemantauan jarak jauh dan keandalan. Dengan demikian, penelitian ini memberikan kontribusi signifikan dalam pengembangan teknologi energi gelombang yang lebih efisien dan berkelanjutan.

UCAPAN TERIMAKASIH

Para penulis ingin menyampaikan penghargaan yang sebesar-besarnya kepada Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi (Kemdikbud) dan Kementerian Keuangan Republik Indonesia atas dukungan dan pendanaan yang tak tergoyahkan dalam memfasilitasi program penelitian ini. Apresiasi khusus diberikan kepada Kedaireka atas perannya dalam mendorong inovasi dan kolaborasi, serta kepada mitra penelitian kami yang terhormat dari Universitas Uni Emirat Arab (UAEU) atas kontribusi dan kerja sama berharga mereka dalam pelaksanaan program Hibah Penelitian Internasional Tematik A3.

Kami juga ingin menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Politeknik Negeri Semarang (Polines) atas partisipasi aktif dan dukungannya dalam memastikan keberhasilan program ini. Kolaborasi ini sangat penting dalam memajukan tujuan program ini, dan kami dengan tulus berterima kasih kepada semua pihak yang terlibat atas dedikasi dan komitmennya terhadap kesuksesannya.

REFERENSI

[1] G. Zhu, Z. Shahroozi, S. Zheng, M. Göteman, J. Engström, and D. Greaves, “Experimental study of interactions between focused waves and a point absorber wave energy converter,” *Ocean Engineering*, vol. 287, 2023, doi: 10.1016/j.oceaneng.2023.115815.

[2] Z. Zhang, J. Qin, D. Wang, W. Wang, Y. Liu, and G. Xue, "Research on wave excitation estimators for arrays of wave energy converters," *Energy*, vol. 264, 2023, doi: 10.1016/j.energy.2022.126133
[3] J. Tan, H. Polinder, A. J. Laguna, and S. Miedema, "A wave-to-wire analysis of the adjustable draft point absorber wave energy converter coupled with a linear permanent-magnet generator," Ocean Engineering, vol. 276, 2023, doi: 10.1016/j.oceaneng.2023.114195.
[4] Y. Yi et al., "Experimental and CFD Assessment of Harmonic Characteristics of Point-Absorber Wave-Energy Converters with Nonlinear Power Take-Off System," J Marine Science Eng, vol. 11, no. 10, 2023, doi: 10.3390/jmse11101860.
[5] I. Mujahidin, S. S. Hidayat, M. C. A. Prabowo, and A. Kitagawa, "C-Slot Circular Polarized Antenna for Hybrid Energy Harvesting and Wireless Sensing," Pertanika, Journal Science Technology, vol. 32, no. 3, pp. 1413–1425, Apr. 2024, doi: 10.47836/pjst.32.3.24.
[6] I. Mujahidin and A. Kitagawa, "Ring slot CP antenna for the hybrid electromagnetic solar energy harvesting and IoT application," Telkomnika (Telecommunication Computing Electronics and Control), vol. 21, no. 2, pp. 290–301, 2023, doi: 10.12928/TELKOMNIKA.v21i2.24739.
[7] W. Chen et al., "Design and experiment of a double-wing wave energy converter," Renewable Energy, vol. 202, 2023, doi: 10.1016/j.renene.2022.12.033.
[8] S. Zheng, J. W. Phillips, M. Hann, and D. Greaves, "Mathematical modelling of a floating Clam-type wave energy converter," Renewable Energy, vol. 210, 2023, doi: 10.1016/j.renene.2023.04.040.
[9] M. Drzewiecki and J. Guziński, "Design and Evaluation of the Compact and Autonomous Energy Subsystem of a Wave Energy Converter," Energies (Basel), vol. 16, no. 23, 2023, doi: 10.3390/en16237699.
[10] Ringwood, John V., Siyuan Zhan, and Nicolás Faedo. "Empowering wave energy with control technology: Possibilities and pitfalls." Annual Reviews in Control 55 (2023): 18-44.
[11] Yassin, Houssein, Tania Demonte Gonzalez, Gordon Parker, and David Wilson. "Effect of the dynamic froude–krylov force on energy extraction from a point absorber wave energy converter with an hourglass-shaped buoy." Applied Sciences 13, no. 7 (2023): 4316.
[12] Yassin, Houssein, Tania Demonte Gonzalez, Kevin Nelson, Gordon Parker, and Wayne Weaver. "Optimal Control of Nonlinear, Nonautonomous, Energy Harvesting Systems Applied to Point Absorber Wave Energy Converters." Journal of Marine Science and Engineering 12, no. 11 (2024): 2078.
[13] Zou, Shangyan, Bryson Robertson, and Solomon Yim. "Practical power absorption assessment limits for generic wave energy converters." Ocean Engineering 277 (2023): 114303.
[14] Siregar, C. A., and Sudirman Lubis. "Perencanaan Instrumen Konversi Energi Tenaga Gelombang Dengan Menggunakan Teknik Kolom Osilasi." Jurnal MESIL (Mesin Elektro Sipil) 1, no. 1 (2020): 63-71.
[15] Siregar, C. A. "Pembuatan Alat Konversi Energi Memanfaatkan Gelombang Dengan Menggunakan Teknik Kolom Osilasi." Jurnal MESIL (Mesin Elektro Sipil) 1, no. 2 (2020): 107-115.
[16] Aminuddin, Jamrud. "Persamaan Energi untuk Perhitungan dan Pemetaan Area yang Berpotensi untuk Pengembangan Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut." Wave: Jurnal Ilmiah Teknologi Maritim 9, no. 1 (2015): 9-16.
[17] B. Zhou, Y. Wang, Z. Zheng, P. Jin, and D. Ning, "Power generation and wave attenuation of a hybrid system involving a heaving cylindrical wave energy converter in front of a parabolic breakwater," Energy, vol. 282, 2023, doi: 10.1016/j.energy.2023.128364
[18] I. Mujahidin and A. Kitagawa, "The Novel CPW 2.4 GHz Antenna with Parallel Hybrid Electromagnetic Solar for IoT Energy Harvesting and Wireless Sensors," International Journal of Advanced Computer Science and Applications, vol. 12, no. 8, 2021, doi: 10.14569/IJACSA.2021.0120845.
[19] S. Rezaei, A. Rahimi, J. Parvizian, S. Mansoorzadeh, and A. Düster, "A rectified unidirectional rotary PTO for two-body wave energy converters," Ocean Engineering, vol. 279, 2023, doi: 10.1016/j.oceaneng.2023.114507

[20] P. Lamont-Kane, M. Folley, C. Frost, and T. Whittaker, "Conceptual hydrodynamics of 2 dimensional lift-based wave energy converters," Ocean Engineering, vol. 298, 2024, doi: 10.1016/j.oceaneng.2024.117084.
[21] M. Masoomi, H. Sarlak, and K. Rezanejad, "Hydrodynamic performance analysis of a new hybrid wave energy converter system using OpenFOAM," Energy, vol. 269, 2023, doi: 10.1016/j.energy.2023.126807.
[22] D. A. Prasetya and I. Mujahidin, "2.4 GHz Double Loop Antenna with Hybrid Branch-Line 90-Degree Coupler for Widespread Wireless Sensor," 2020. doi: 10.1109/eeccis49483.2020.9263477.
[23] G. Giorgi, "Embedding parametric resonance in a 2:1 wave energy converter to get a broader bandwidth," *Renew Energy*, vol. 222, 2024, doi: 10.1016/j.renene.2023.119928.
[24] I. Mujahidin and A. Kitagawa, "CP Antenna with 2 × 4 Hybrid Coupler for Wireless Sensing and Hybrid RF Solar Energy Harvesting," Sensors (Switzerland), vol. 21, pp. 1–20, 2021, doi: 10.3390/s21227721
[25] B. Zhou, Q. Zhang, J. Hu, P. Jin, H. Zhang, and S. Zheng, "Power performance of an asymmetric wave energy converter near a partial reflection wall," Ocean Engineering, vol. 280, 2023, doi: 10.1016/j.oceaneng.2023.114634.
[26] X. Jiang, H. Shi, F. Cao, Z. Zhao, M. Li, and Z. Chen, "System analysis and experimental investigation of a pendulum-based wave energy converter," Ocean Engineering, vol. 277, 2023, doi: 10.1016/j.oceaneng.2023.114300.
[27] S. Zou, J. Song, and O. Abdelkhalik, "A sliding mode control for wave energy converters in presence of unknown noise and nonlinearities," *Renew Energy*, vol. 202, 2023, doi: 10.1016/j.renene.2022.11.078.
[28] Y. Zhang, Y. Wen, X. Han, W. Zhang, F. Gao, and W. Chen, "Gyroscopic wave energy converter with a self-accelerating rotor in WEC-glider," Ocean Engineering, vol. 273, 2023, doi: 10.1016/j.oceaneng.2023.113819.
[29] I. Yang, T. Tezdogan, and A. Incecik, "Numerical investigations of a pivoted point absorber wave energy converter integrated with breakwater using CFD," Ocean Engineering, vol. 274, 2023, doi: 10.1016/j.oceaneng.2023.114025.