

Pengembangan Sistem Pemantauan Generator pada Pembangkit Listrik Tenaga Hidrokinetik Bawah Air

M. Maulana Akbar¹, Eka Meilisa Anggi Saputri², Lutfir Rahman Aliffianto^{*3}, Ilham Agung Wicaksono⁴, Muhammad Yanuar⁵, Dio Lavyarel Alif Setiawan⁶, M. Putra Aldiansyah⁷, Iqbal Rheza Firmansyah⁸, M. Ammar Rosyadi⁹

^{1,2,*3,4,5,6,7,8,9} Departemen Teknik Elektro Otomasi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Email: ¹maulanakbar217@gmail.com, ²ekameilisaasp@gmail.com, ³lrahman@its.ac.id, ⁴ilham.agung@its.ac.id, ⁵muhammadyanuar2314@gmail.com, ⁶dioalif30@gmail.com, ⁷putraardiansyah5758@gmail.com, ⁸iqbalrhezafirmansyah@gmail.com, ⁹m.ammarsyadi@gmail.com

Abstrak

Indonesia memiliki potensi energi arus laut yang besar namun pemanfaatannya masih terbatas karena belum tersedianya sistem pemantauan untuk menjaga generator dari kondisi abnormal. Tujuan penelitian ini untuk mengembangkan sistem pemantauan yang memadai dalam memantau parameter operasional seperti tegangan, arus, kecepatan, dan suhu yang dihasilkan *Permanent Magnet Generator* (PMG) pada penerapan pemanfaatan energi hidrokinetik. Sistem pemantauan PMG ini dibuat untuk menganalisis parameter kecepatan putar menggunakan sensor proximity, suhu dengan sensor thermocouple, arus keluaran secara kontinu, CAN bus MCP2515 sebagai komunikasi data dan antarmuka HMI Nextion untuk menampilkan data pemantauan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor proximity memiliki akurasi tinggi dengan nilai *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE) sebesar 1.00%, sedangkan thermocouple menunjukkan MAPE sebesar 3.23% dengan bias konsisten $\pm 1^\circ\text{C}$. Data hasil uji PMG menunjukkan peningkatan tegangan dari 4 VAC pada 49,9 RPM menjadi 23,4 VAC pada 398,2 RPM, serta peningkatan arus dari 1,2 A menjadi 8,5 A pada rentang RPM yang sama, yang mengindikasikan kinerja generator sesuai dengan prinsip induksi elektromagnetik. Sistem ini sebagai deteksi dini terhadap anomali operasional dan mendukung pemeliharaan preventif untuk penggunaan PMG di lingkungan laut.

Kata kunci: CAN Bus, PMG, Thermocouple, Proximity, Hidrokinetik

Abstract

Indonesia possesses significant potential for harnessing ocean current energy. However, its utilization remains limited due to the lack of a reliable monitoring system to safeguard generators from abnormal operating conditions. This study aims to develop a comprehensive monitoring system capable of tracking key operational parameters including voltage, current, rotational speed, and temperature of a *Permanent Magnet Generator* (PMG) used in hydrokinetic energy applications. The system measures rotational speed using a proximity sensor, temperature using a thermocouple, and output current in real time. Data communication is implemented through the MCP2515 CAN bus protocol, and monitoring results are displayed using a Nextion Human-Machine Interface (HMI). Experimental results demonstrate that the proximity sensor achieves high accuracy, with a *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE) of 1.00%, while the thermocouple records a MAPE of 3.23% and maintains a consistent bias of $\pm 1^\circ\text{C}$. Testing of the PMG shows an increase in voltage from 4 VAC at 49.9 RPM to 23.4 VAC at 398.2 RPM, accompanied by a rise in current from 1.2 A to 8.5 A across the same speed range validating the generator's performance based on electromagnetic induction principles. This monitoring system facilitates early detection of operational anomalies and supports preventive maintenance efforts, thereby improving the reliability and sustainability of PMG deployment in marine environments.

Keywords: CAN Bus, PMG, Thermocouple, Proximity, Hydrokinetic

I. PENDAHULUAN

Indonesia membutuhkan tindakan cepat untuk memanfaatkan energi arus laut demi ketahanan energi nasional. Saat ini, potensi arus dengan kecepatan hingga 2 m/s di berbagai wilayah belum dioptimalkan secara serius [1]. Kebijakan UU No. 30/2007 tentang Energi dan Perpres No. 22/2017 tentang RUEN sudah ada, namun penerapan riset dan pengembangan teknologi masih tertinggal. Jika tidak segera diatasi, kesempatan ini akan terbuang dan ketergantungan pada sumber energi fosil justru akan semakin meningkat. Tujuan utama dari regulasi kebijakan UU tersebut adalah untuk mendukung terwujudnya kemandirian dan ketahanan energi nasional. Sebagai contoh, arus pasang surut di Selat Toyopakeh, Bali, tercatat mampu mencapai kecepatan 2 m/s selama 5 hingga 20 jam per hari [2]. Potensi energi ini

berpeluang besar untuk dikonversi menjadi listrik guna meningkatkan rasio elektrifikasi nasional serta memenuhi kebutuhan energi masyarakat, khususnya di kawasan kepulauan. Di Indonesia, sejumlah lembaga, termasuk Balai Teknologi Hidrodinamika BPPT (BTH-BPPT), telah aktif dalam melakukan riset dan pengembangan pembangkit listrik tenaga arus laut. Kegiatan yang dilakukan meliputi pemetaan potensi secara numerik, perancangan dan pembuatan prototipe, hingga uji coba turbin skala penuh di beberapa lokasi perairan [1].

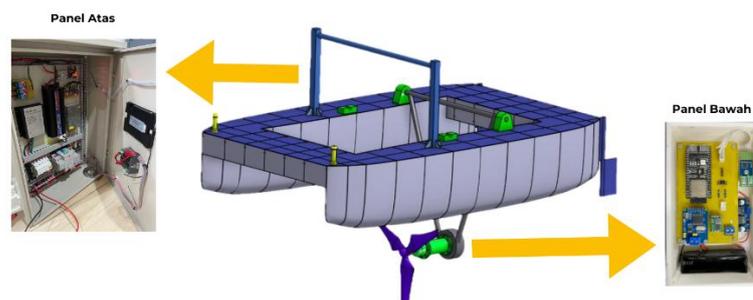
Keberlanjutan sistem pembangkit listrik tenaga hidrokinetik juga sangat bergantung pada kemampuan dalam melakukan pemantauan kinerja sistem secara real-time. Sistem pemantauan yang bisa diagnosis kondisi komponen di bawah air seperti generator sangat diperlukan mengingat mahalnya biaya operasional dan pemeliharaan akibat kondisi lingkungan laut yang ekstrem serta kendala aksesibilitas yang tinggi [3]. Penerapan sistem pemantauan berbasis data operasional memberikan manfaat berupa umpan balik terhadap kondisi aktual sistem dan performa energi, sekaligus memungkinkan deteksi dini terhadap potensi kerusakan komponen [4]. Salah satu langkah penting untuk mencegah kerusakan pada generator adalah dengan memantau operasi generator dan menganalisis ketidakteraturan data yang diukur [5]. Hal ini membuat kontinuitas operasi sistem dapat ditingkatkan melalui pemeliharaan secara preventif.

Dalam penelitian ini, sistem pemantauan dirancang dalam dua bagian utama, yaitu panel bawah dan panel atas. Panel bawah dipasang bersama generator dan transmisi mekanis di bawah permukaan air untuk membaca dan memproses data dari sensor suhu serta sensor kecepatan poros. Data sensor kemudian dikirim via protokol komunikasi CAN bus ke panel atas. Pada panel atas, data akan ditampilkan secara kontinu melalui antarmuka pengguna yang mudah dipahami.

Tujuan penelitian ini adalah menerapkan sistem pemantauan real-time pada *Permanent Magnet Generator* (PMG) dalam pemanfaatan energi hidrokinetik. Sistem ini akan memantau secara kontinu parameter seperti kecepatan putar (RPM), suhu, tegangan, dan arus keluaran, sehingga potensi masalah seperti suhu berlebih atau kecepatan tidak normal akibat perubahan arus laut dapat terdeteksi lebih awal. Dengan deteksi dini, strategi perawatan preventif dapat dijalankan sebelum terjadi kerusakan lebih parah [6]. Data yang dihasilkan diharapkan mampu meningkatkan kinerja pembangkit listrik tenaga hidrokinetik di Indonesia.

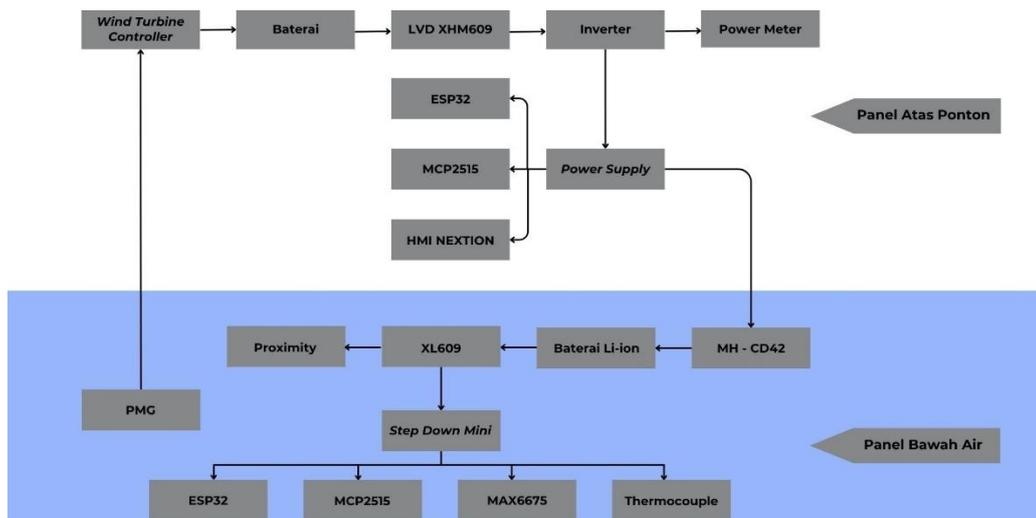
II. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental untuk merancang dan menguji sistem pemantauan generator energi hidrokinetik. Sistem ini bertujuan untuk memantau parameter-parameter utama yang memengaruhi performa generator. Parameter generator yang dipantau yaitu tegangan, arus, suhu, dan kecepatan putaran (RPM) secara real-time. Metode dimulai dengan perancangan dua panel utama, yaitu panel bawah yang diletakkan di bawah air bersama dengan generator dan sistem transmisi mekanis, serta panel atas yang berada di permukaan sebagai pusat pemantauan.



Gambar 1. Panel Controller Atas dan Bawah Air

Panel bawah dilengkapi dengan sensor kecepatan dan suhu, mikrokontroler ESP32-S3 untuk pemrosesan data lokal, serta modul komunikasi CAN Bus MCP2515 untuk mengirim data ke panel atas. Modul ini diberi daya oleh baterai Li-ion 3.7V yang dapat diisi ulang menggunakan modul MH-CD42, dengan pengisian dilakukan melalui kabel DC dari panel atas.



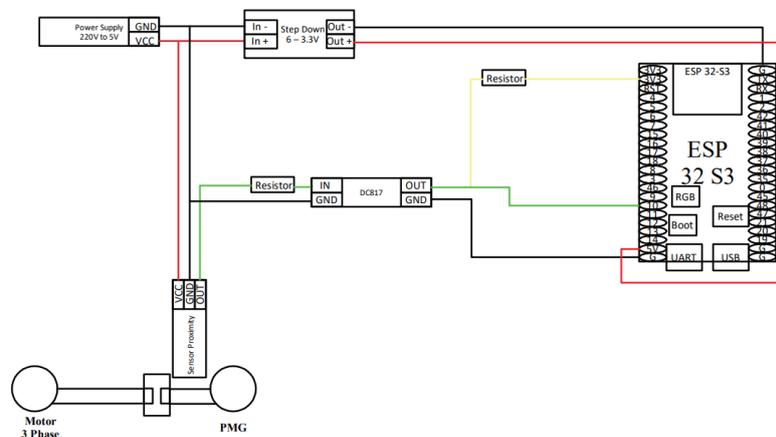
Gambar 2. Arsitektur Sistem

Panel atas berfungsi sebagai kontrol dan visualisasi data. Panel ini terdiri dari sensor tegangan dan arus berupa power meter 3-fasa, mikrokontroler ESP32-S3, serta antarmuka pengguna HMI Nextion untuk menampilkan data sensor. Komunikasi antara panel atas dan bawah dilakukan menggunakan jaringan CAN Bus. Suplai daya panel atas berasal dari sumber eksternal 5V dengan arus maksimum 10A. Komponen utama sistem meliputi *Permanent Magnet Generator* (PMG), sensor proximity induktif tipe PNP NO untuk pembacaan kecepatan rotasi poros dengan jarak skala mikrometer hingga milimeter [7], dan sensor suhu thermocouple tipe K yang terhubung dengan modul MAX6675. Sensor thermocouple dengan tipe K memiliki karakteristik mampu mengukur suhu dengan akurasi yang baik[8] Sinyal dari sensor proximity dikondisikan dengan rangkaian optocoupler dan resistor untuk kestabilan sinyal. Mikrokontroler ESP32-S3 digunakan di kedua panel sebagai pusat kendali dan pemrosesan. Untuk pengukuran arus dan tegangan digunakan power meter dengan modul TTL-RS485 untuk komunikasi ke ESP32-S3. Distribusi daya internal untuk panel bawah dilakukan dengan menggunakan modul step-up XL6009E1 dan step-down regulator.

Pengujian sensor kecepatan dilakukan dengan membandingkan hasil pembacaan sensor proximity dengan alat ukur tachometer. Sensor dipasang pada shaft PMG yang digerakkan oleh motor 3-fasa melalui karet kopling, sedangkan tachometer digunakan sebagai alat ukur referensi. Kecepatan motor dinaikkan secara bertahap dan data dari kedua alat dicatat. Akurasi sensor diuji menggunakan perhitungan *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE), yang merupakan ukuran umum untuk menilai tingkat kesalahan [9].

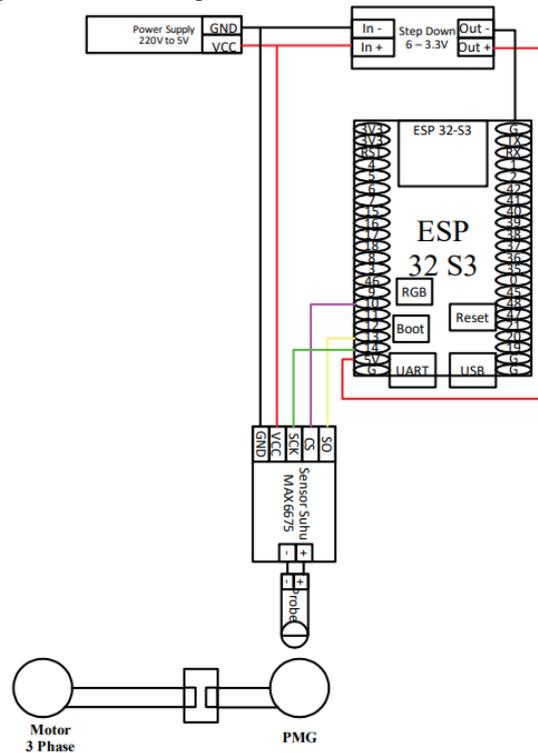
$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{|X_{Sensor,i} - X_{Referensi,i}|}{X_{Referensi,i}} \right) \times 100\% \quad [1]$$

Dengan $X_{(Sensor, i)}$ dari hasil pembacaan sensor *proximity* dan $X_{(Referensi, i)}$ dari hasil pembacaan *Tachometer*.



Gambar 3. Sistem Kelistrikan Sensor Kecepatan

Pengujian sensor suhu dilakukan dengan membandingkan hasil pembacaan sensor Thermocouple terhadap termogun sebagai alat referensi. Penggunaan sensor suhu thermocouple tipe K dinilai cukup sensitif dibandingkan tipe R atau B [10] Sensor dipasang pada badan PMG, kemudian motor dinyalakan selama 30 menit, dan data dicatat setiap 3 menit sekali oleh kedua alat untuk dilakukan perbandingan dan penghitungan MAPE (persamaan 1). Dengan $X_{(Sensor, i)}$ dari hasil pembacaan sensor *Thermocouple* dan $X_{(Referensi, i)}$ dari hasil pembacaan *Termogun*.



Gambar 4. Sistem Kelistrikan Sensor Suhu

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik keluaran tegangan dan arus dari Permanent Magnet Generator (PMG) pada berbagai tingkat kecepatan putar, dengan baterai 24V 100Ah sebagai beban. PMG digerakkan oleh Motor Induksi 3 Fasa 30 kW, yang kecepatannya diatur melalui Variable Speed Drive (VSD) Altivar 630, dengan transmisi menggunakan belt. Peralatan utama yang digunakan meliputi PMG, motor induksi, VSD, sensor proximity untuk mengukur RPM, multimeter untuk pengukuran arus dan tegangan, serta baterai sebagai beban. Data pengukuran tegangan dan arus dicatat setiap kenaikan frekuensi dari VSD, mulai dari 1 Hz hingga mendekati kecepatan nominal generator. Proses pengambilan data dilakukan secara sistematis untuk menjamin akurasi, dengan mencatat nilai RPM, tegangan, dan arus pada setiap titik pengujian. Data yang diperoleh akan disajikan dalam bentuk tabel dan digunakan sebagai dasar untuk analisis kinerja PMG terhadap spesifikasi nominalnya.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari hasil pengukuran di lapangan, diperoleh data hasil dari sensor proximity untuk pembacaan kecepatan generator dan sensor thermocouple untuk pembacaan suhu generator. Hasil pengukuran tersebut kemudian di analisa untuk dapat mengetahui nilai *error* dari pembacaan sensor. Hal ini diperlukan untuk mengetahui keandalan dari sensor dalam melakukan pemantauan. Pengukuran juga dilakukan untuk menguji kemampuan generator.

3.1. Pengujian RPM *Permanent Magnet Generator*

Berdasarkan hasil pengujian **Tabel 1**, sensor Proximity menunjukkan performa yang sangat baik dalam membaca kecepatan PMG jika dibandingkan dengan Tachometer sebagai referensi. Nilai *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE) sebesar 1.00% mengindikasikan bahwa rata-rata kesalahan pengukuran sangat rendah, sehingga sensor ini memiliki tingkat akurasi yang tinggi.

Tabel 1. Nilai Hasil Pengujian Sensor Pembacaan Kecepatan

ID Pengujian	Pembacaan Tachometer (RPM)	Pembacaan Sensor Proximity (RPM)	Absolute Error (%)
1	23	21	8,7
2	67	67	0,0
3	106	106	0,0
4	143	143	0,0
5	180	180	0,0
6	217	218	0,46
7	255	255	0,0
8	292	292	0,0
9	328	329	0,30
10	367	365	0,54

Sebagian besar pengukuran menunjukkan error sebesar 0%, terutama pada rentang kecepatan menengah hingga tinggi (67 RPM hingga 367 RPM). Hal ini menunjukkan bahwa sensor proximity bekerja secara konsisten pada kecepatan tersebut. Namun, pada kecepatan rendah (23 RPM), terjadi kesalahan maksimum sebesar 8.70%. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh pembacaan pada kecepatan rendah yang lebih sensitif terhadap fluktuasi kecil atau *noise*. Meskipun demikian, tidak ada nilai *outlier* besar (*error* sangat tinggi) yang ditemukan, sehingga konsistensi sensor secara keseluruhan memenuhi kriteria akurasi yang dibutuhkan untuk aplikasi pengukuran kecepatan PMG.

3.2. Pengujian Suhu *Permanent Magnet Generator*

Berdasarkan hasil **Tabel 2**, sensor suhu menunjukkan performa yang cukup baik dalam membaca suhu jika dibandingkan dengan *termogun* sebagai referensi. Nilai *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE) sebesar 3.23% mengindikasikan bahwa rata-rata kesalahan pengukuran relatif kecil. Pada semua pengukuran, sensor suhu menunjukkan *error* yang konsisten sebesar 3.23%.

Tabel 2. Nilai Hasil Pengujian Sensor Pembacaan Suhu

ID Pengujian	Pembacaan Termogun (°C)	Pembacaan Thermocouple (°C)	Absolute Error (%)
1	31	32	3,23
2	31	32	3,23
3	31	32	3,23
4	31	32	3,23
5	31	32	3,23
6	31	32	3,23
7	31	32	3,23
8	31	32	3,23
9	31	32	3,23
10	31	32	3,23

Hal ini menunjukkan bahwa sensor suhu cenderung membaca suhu lebih tinggi sebesar 1°C dibandingkan dengan *termogun*. Konsistensi *error* yang sama pada setiap pengukuran mengindikasikan bahwa sensor suhu memiliki pola kesalahan yang stabil dan tidak acak. Kesalahan yang konsisten ini disebabkan oleh faktor kalibrasi sensor suhu yang kurang tepat atau adanya bias sistemik dalam pembacaan sensor. Sehingga perlu dilakukan kalibrasi ulang untuk meningkatkan hasil pembacaan yang lebih akurat. Secara keseluruhan, sensor ini memenuhi kriteria akurasi yang dapat diterima untuk pengukuran suhu dalam kondisi tertentu.

3.3. Hasil Pengujian *Permanent Magnet Generator*

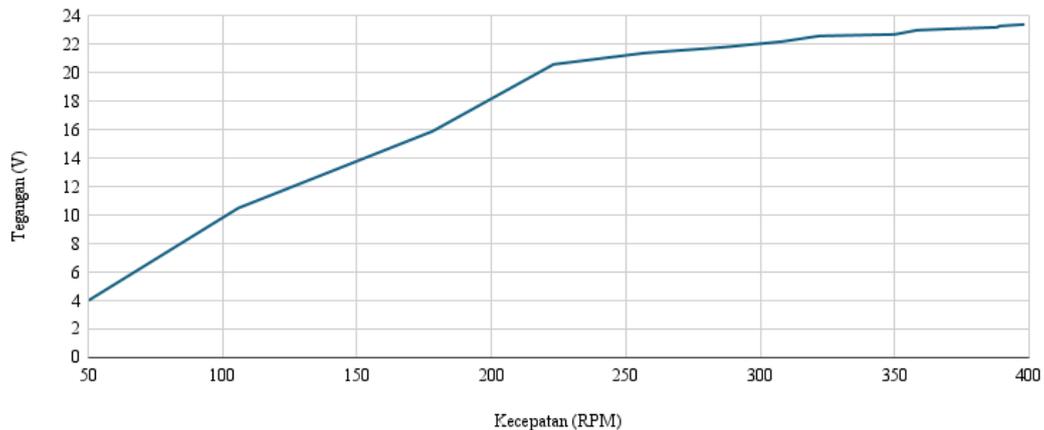
Tabel hasil uji coba menunjukkan hubungan antara kecepatan putaran PMG (RPM) dan tegangan output yang dihasilkan oleh *Permanent Magnet Generator* (PMG). Untuk memberikan visualisasi yang lebih jelas terhadap tren ini, data dari tabel tersebut kemudian digambarkan dalam bentuk grafik.

Tabel 3. Nilai Hasil Pengujian Sensor Pembacaan Kecepatan

Sett. VSD (Hz)	Kecepatan PMG (RPM)	Tegangan PMG (V)	Arus PMG (A)
1	49,9	4	1,2
2	105,7	10,5	1,4
3	178	15,9	1,8
4	223	20,6	1,7
5	257	21,4	2,3
6	286	21,8	2,9
7	308	22,2	4,2
8	322	22,6	5,1
9	349	22,7	6

Grafik ini bertujuan untuk memperlihatkan bagaimana perubahan kecepatan secara langsung mempengaruhi besar tegangan dan arus PMG.

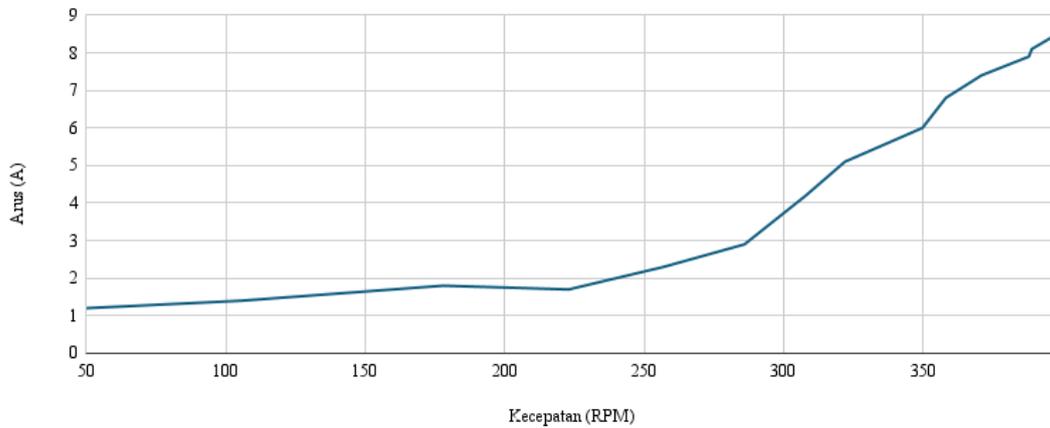
Hubungan Kecepatan Putaran (RPM) terhadap Tegangan Antar Fase (V)



Gambar 5. Hubungan RPM terhadap Tegangan Antar Fase

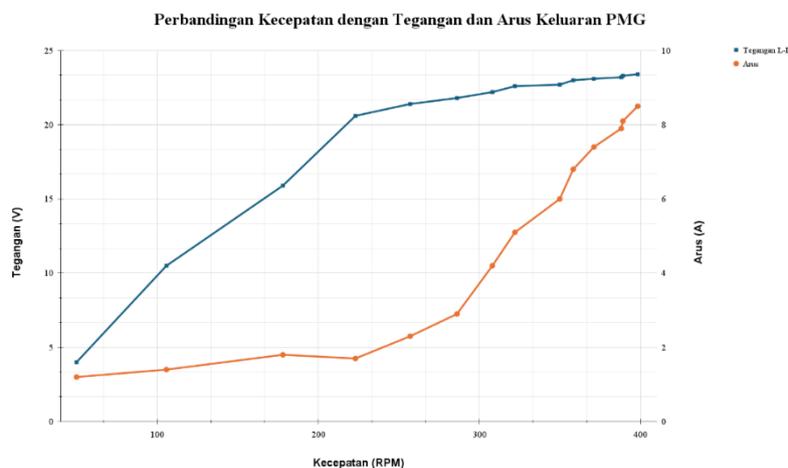
Berdasarkan grafik **Gambar 5.** tersebut menunjukkan bahwa tegangan keluaran dari *Permanent Magnet Generator* (PMG) meningkat secara signifikan dengan bertambahnya kecepatan putaran rotor (RPM). Pada kecepatan rendah, yaitu 49.9 RPM, tegangan antar fase yang dihasilkan masih kecil, yaitu sebesar 4 VAc. Namun, saat RPM meningkat, tegangan juga mengalami peningkatan secara bertahap hingga mencapai nilai maksimum 23.4 VAc pada kecepatan tertinggi yang diuji, yaitu 398.2 RPM. Fenomena ini konsisten dengan prinsip kerja generator, di mana tegangan induksi dalam kumparan stator berbanding lurus dengan kecepatan putaran rotor. Pada PMG, rotor dilengkapi dengan magnet permanen yang menciptakan fluks magnetik. Ketika rotor berputar, fluks magnetik yang melewati kumparan stator berubah secara periodik. Sesuai dengan hukum Faraday tentang induksi elektromagnetik, perubahan fluks magnetik yang lebih cepat, akibat peningkatan kecepatan putar rotor, menghasilkan tegangan induksi yang lebih besar.

Hubungan Kecepatan Putaran (RPM) terhadap Arus Keluaran (A)



Gambar 6. Hubungan RPM terhadap Arus Keluaran PMG

Berdasarkan grafik **Gambar 6.** tersebut menunjukkan bahwa arus keluaran dari *Permanent Magnet Generator* (PMG) mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya kecepatan putaran rotor (RPM). Pada RPM rendah, yaitu 49.9 RPM, arus yang dihasilkan sebesar 1.2 A. Seiring dengan peningkatan kecepatan rotor, arus keluaran terus meningkat hingga mencapai nilai maksimum sebesar 8.5 A pada RPM tertinggi yang diuji, yaitu 398.2 RPM. Peningkatan arus ini dapat dijelaskan oleh prinsip dasar kerja generator, di mana daya keluaran PMG yang dihasilkan meningkat dengan bertambahnya kecepatan putaran rotor. Ketika RPM meningkat, fluks magnetik yang diinduksi dalam kumparan stator tidak hanya menghasilkan tegangan yang lebih tinggi tetapi juga meningkatkan kemampuan generator untuk menyediakan arus yang lebih besar sesuai dengan beban yang terhubung. Dengan kata lain, semakin cepat rotor berputar, semakin besar energi listrik yang dapat disuplai oleh PMG.



Gambar 7. Perbandingan Kecepatan dengan Tegangan dan Arus Keluaran PMG

Dari hasil pengujian, dapat disimpulkan bahwa PMG bekerja dengan baik dalam menghasilkan tegangan dan arus yang meningkat seiring dengan kenaikan RPM. Hal ini sesuai dengan prinsip induksi elektromagnetik, di mana semakin cepat rotor berputar, semakin besar tegangan dan arus yang dihasilkan. Secara keseluruhan, hasil pengujian ini menunjukkan bahwa PMG memiliki performa yang cukup baik dan dapat digunakan dalam berbagai aplikasi. Namun, pengelolaan tegangan, arus, serta sistem pendinginan tetap menjadi faktor penting yang perlu diperhatikan agar generator dapat beroperasi dengan efisien dan andal dalam jangka panjang.

IV. KESIMPULAN

Hasil penelitian menunjukkan keberhasilan pengembangan sistem pemantauan pada *Permanent Magnet Generator* (PMG) untuk penerapan energi hidrokinetik, yang menyediakan solusi penting dalam memantau kinerja dan mendeteksi anomali di kondisi operasi yang menantang. Pengujian sistem menunjukkan kemampuan akuisisi data yang akurat. Sensor proximity mencatat performa yang sangat baik dengan *error* sebesar 0% pada rentang kecepatan menengah hingga tinggi (67–367 RPM), meskipun terdapat *error* maksimum 8,7% pada kecepatan rendah (23 RPM) akibat dari sensitivitas terhadap noise. Sementara itu, sensor thermocouple menunjukkan nilai Mean Absolute Percentage Error (MAPE) sebesar 3,23% dan bias sistemik sebesar $\pm 1^{\circ}\text{C}$.

Data yang dikumpulkan dari sistem ini secara empiris memvalidasi kinerja PMG sesuai prinsip induksi elektromagnetik, terbukti dari peningkatan tegangan 4 VAC pada 49,9 RPM menjadi 23,4 VAC pada 398,2 RPM, serta peningkatan arus dari 1,2 A menjadi 8,5 A seiring peningkatan RPM. Hasil ini tidak hanya mengkonfirmasi kepatuhan PMG terhadap hukum dasar fisika, tetapi juga menegaskan kemampuan inti sistem yang dikembangkan: pemantauan kinerja PMG secara real-time. Fungsi ini menyediakan data krusial untuk analisis historis performa dan, yang terpenting, sebagai deteksi dini potensi anomali operasional. Hal ini menjadi fondasi vital bagi implementasi strategi pemeliharaan prediktif dan preventif, terutama untuk PMG yang beroperasi di lingkungan laut yang keras, sehingga berkontribusi pada keandalan, efisiensi, dan umur panjang operasional PMG. Sebagai pengembangan lanjutan sistem ini dengan menambahkan sensor mendeteksi kebocoran untuk keamanan dan ketahanan operasional jangka panjang, khususnya di lingkungan laut.

REFERENSI

- [1] A. Kasharjanto, D. Rahuna, dan Rina, and B. Teknologi Hidrodinamika BPPT, “KAJIAN PEMANFAATAN ENERGI ARUS LAUT DI INDONESIA Study on the Implementation Of Marine Current Energy In Indonesia,” 2017.
- [2] E. Muhammad Zikra, I. Mukhtasor, and D. Teknik Kelautan Fakultas Teknologi Kelautan, “TUGAS AKHIR-MO 141336 ANALISA POLA ARUS LAUT DALAM Mendukung PENGEMBANGAN ENERGI LISTRIK TENAGA ARUS DI SELAT TOYOPAKEH, NUSA PENIDA, BALI JIHAD FARUQ HAQIQI NRP. 0431 1240 000 007 DOSEN PEMBIMBING,” 2018.
- [3] S. A. Mortazavizadeh, R. Yazdanpanah, D. C. Gaona, and O. Anaya-Lara, “Fault Diagnosis and Condition Monitoring in Wave Energy Converters: A Review,” Oct. 01, 2023, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/en16196777.
- [4] N. I. Vasilikis, R. D. Geertsma, and K. Visser, “Operational data-driven energy performance assessment of ships: the case study of a naval vessel with hybrid propulsion,” *Journal of Marine Engineering and Technology*, vol. 22, no. 2, pp. 84–100, 2023, doi: 10.1080/20464177.2022.2058690.
- [5] *1010-2022 - IEEE Guide for Control of Hydroelectric Power Plants*. IEEE, 2023.
- [6] B. Septian, P. Rakesh, and S. Rajiv Dhora, “IoT Based Power Monitoring System for Diesel Generator,” in *2020 5th IEEE International Conference on Recent Advances and Innovations in Engineering, ICRAIE 2020 - Proceeding*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Dec. 2020. doi: 10.1109/ICRAIE51050.2020.9358316.
- [7] Z. Chen and R. C. Luo, “Design and Implementation of Capacitive Proximity Sensor Using Microelectromechanical Systems Technology,” 1998.
- [8] V. Chang and C. Martin, “An industrial IoT sensor system for high-temperature measurement,” *Computers and Electrical Engineering*, vol. 95, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.compeleceng.2021.107439.
- [9] A. De Myttenaere, B. Golden, B. Le Grand, and F. Rossi, “Mean Absolute Percentage Error for regression models,” *Artificial Neural Networks*, vol. 192, pp. 38–48, 2015, doi: 10.1016/j.neucom.2015.12.114i.
- [10] Z. Liu, H. Ma, T. Liu, L. Xu, and Y. Jiang, “Calibration of Static System of K-Type Wire Thermocouple,” in *2024 IEEE 2nd International Conference on Image Processing and Computer Applications, ICIPCA 2024*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2024, pp. 1575–1579. doi: 10.1109/ICIPCA61593.2024.10709250.