

PERANCANGAN SISTEM KONTROL PADA SIMULATOR TURBIN ANGIN SUMBU HORIZONTAL

Ahmad Fahriannur^{1*)}, Novangga Adi Mulyono¹, Dedy Eko Rahmanto¹ dan Nur Faizin¹

¹Program Studi Teknik Energi Terbarukan, Jurusan Teknik, Politeknik Negeri Jember, Jember, Indonesia

*Penulis korespondensi, E-mail: ahmad_fahriannur@polije.ac.id

Abstrak

Generator berkapasitas daya 5 watt diaplikasikan kedalam Turbin Angin Sumbu Horizontal setinggi 50 cm dengan jumlah bilah sebanyak 3 unit. Turbin digerakkan menggunakan blower kipas setinggi 50 cm dengan kecepatan angin sebesar 5,5 m/s. Ketika turbin berputar, generator akan menghasilkan tegangan listrik dc. Jika dihubungkan dengan beban, maka akan timbul arus listrik dan akan menghasilkan daya maksimal sebesar 5 watt. Output turbin angin dihubungkan dengan sistem kontrol yang terdiri dari Mikrokontroler Arduino, driver relay, sensor, LCD 16x2 dan SD card. Semakin besar kecepatan angin yang dihasilkan blower, semakin cepat pula putaran turbin dan akan menghasilkan tegangan output yang semakin besar. Oleh karena itu, diperlukan sistem kontrol pengereman untuk membatasi tegangan pada nilai 12 volt. Sehingga tegangan output turbin angin akan tetap terjaga pada tegangan 12 volt meskipun kecepatan angin semakin tinggi. Sistem kontrol yang dibangun menggunakan metode Proportional-Integral-Derivative (PID) dan berhasil melakukan pengereman turbin angin hingga mencapai nilai target tegangan yaitu sebesar 12 volt dalam waktu 5 detik dengan nilai *error steady state* 2,08%.

Kata kunci: turbin angin, kontrol, pengereman, PID

Abstract

A 5-watt generator is applied to a 50-cm-tall Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT) equipped with three blades. The turbine is driven using a 50-cm blower fan that produces a wind speed of 5.5 m/s. When the turbine rotates, the generator produces a DC voltage. When connected to a load, an electric current is generated and the system can deliver a maximum power of 5 watts. The wind turbine output is connected to a control system consisting of an Arduino microcontroller, a relay driver, sensors, a 16x2 LCD, and an SD card. The higher the wind speed produced by the blower, the faster the turbine rotates, resulting in a higher output voltage. Therefore, a braking control system is required to limit the voltage to 12 volts. This ensures that the wind turbine output voltage remains at 12 volts even when the wind speed increases. The control system developed uses the Proportional-Integral-Derivative (PID) method and successfully performs braking on the wind turbine, reaching the target voltage of 12 volts within 5 seconds with a steady-state error of 2.08%

Keywords: wind turbine, control, brake, PID

1. Pendahuluan

Kebutuhan energi listrik semakin meningkat seiring dengan pertumbuhan penduduk, perkembangan industri, dan peningkatan aksesibilitas fasilitas dalam kehidupan masyarakat modern. Di Indonesia, rasio elektrifikasi dan konsumsi listrik per kapita terus mengalami kenaikan, sehingga menuntut ketersediaan pembangkit listrik yang andal, efisien, serta ramah lingkungan. Salah satu upaya strategis adalah pemanfaatan energi terbarukan, termasuk energi angin, melalui pengembangan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB). Energi angin memiliki beberapa

keunggulan penting: bersifat tak terbatas dalam jangka panjang, tidak menghasilkan emisi gas rumah kaca saat operasi, dan menawarkan potensi diversifikasi sumber energi yang mendukung ketahanan energi nasional. Dalam konteks Indonesia, survei potensi menunjukkan bahwa negara ini memiliki kekayaan sumber daya angin yang signifikan — misalnya potensi sebesar sekitar 154,9 GW yang terdiri dari 60,7 GW on-shore dan 94,2 GW offshore. [1]. Namun, pada kenyataannya realisasi kapasitas PLTB di Indonesia masih sangat rendah dibanding potensi yang ada, sehingga terdapat kesenjangan antara potensi teoretis dan implementasi di lapangan. (misalnya kapasitas terpasang yang jauh di bawah target nasional) [2].

Pengembangan PLTB di Indonesia juga dihadapkan pada berbagai tantangan, seperti kecepatan angin yang relatif rendah di beberapa lokasi, kondisi infrastruktur jaringan listrik yang belum sepenuhnya memadai, regulasi dan insentif yang belum optimal, serta tingginya biaya investasi awal.

Turbin angin pada PLTB digerakkan menggunakan energi angin dan menghasilkan energi kinetik sehingga akan membangkitkan energi listrik. Semakin besar energi angin yang diterima, akan semakin cepat pula putaran turbinnya. Putaran turbin angin, memiliki keterbatasan dari segi kekuatan bilah dan generator [3]. Penelitian yang dilakukan oleh Tole Sutikno [4], membangun sistem Pengereman turbin angin menggunakan kontrol logika Fuzzy. Turbin Angin yang dikendalikan adalah turbin angin horizontal yang terintegrasi dengan PLTH berlokasi di Bantul, Yogyakarta. Tegangan pada output turbin angin dikendalikan pada tegangan 13,8 volt. Kemudian, metoda pengereman secara mekanik dilakukan oleh Nijat [5], dengan cara memodifikasi rotor turbin angin dengan memasang rem mekanis berbentuk cakram untuk menahan putaran turbin angin jika tegangan yang dihasilkan melebihi nilai yang diinginkan (set point). Rodriguez [6], membangun sistem pengereman darurat turbin angin dengan kapasitas daya 400 watt. Turbin angin menggunakan generator AC 3 fasa yang disearahkan ke tegangan DC kemudian dihubungkan dengan MOSFET sebagai perangkat utama untuk pengereman turbin angin.

Sistem pengereman turbin angin sangat diperlukan untuk menghindari terjadinya *overspeed* saat kecepatan angin sangat tinggi. Sehingga dapat menjaga kondisi bilah dan generatornya. Ketika putaran turbin angin semakin tinggi, semakin besar pula tegangan yang dihasilkan. Kontrol pengereman turbin angin dapat dilakukan secara mekanik maupun dan secara elektrik. Dalam penelitian ini, dibangun sistem pengereman turbin angin secara elektrik dengan cara langsung dikoneksikan terhadap output turbin angin. Output turbin angin dijaga nilai supaya tetap sebesar 12 volt sesuai dengan tegangan pada baterai. Jadi, meskipun kecepatan angin sangat tinggi, nilai output turbin angin maksimal sebesar 12 volt.

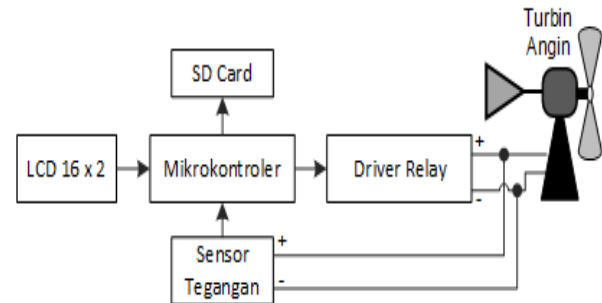
2. Metode

2.1. Perancangan Sistem Elektrik

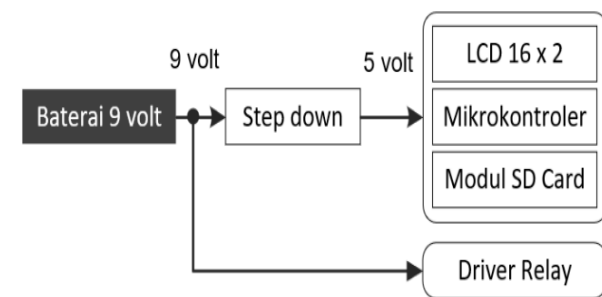
Turbin Angin Sumbu Horizontal yang digunakan dalam penelitian ini memiliki kapasitas daya output sebesar 5 watt DC. Output turbin dihubungkan dengan sistem kontrol yang terdiri dari Mikrokontroler, LCD, driver relay, sensor tegangan, dan modul SD Card seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 1. Output turbin angin yang memiliki tegangan DC langsung terhubung dengan sistem kontrol.

Perangkat sistem kontrol yang dibangun menggunakan baterai eksternal sebagai sumber dayanya sebesar 9 volt

yang selanjutnya diturunkan ke tegangan 5 volt melalui stepdown untuk suplai LCD, mikrokontroler, dan modul SD Card sebagai perangkat penyimpanan data. Adapun driver relay menggunakan suplai langsung tegangan 9 volt seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 2.

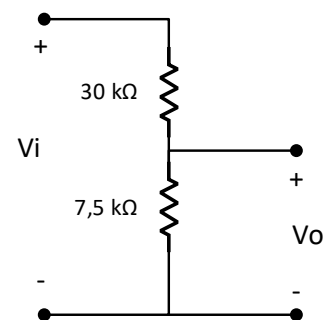


Gambar 1. Blok diagram sistem



Gambar 2. Blok diagram sistem

Output tegangan turbin angin, dibaca oleh sensor dan diproses oleh mikrokontroler. Hasil pengolahan data mikrokontroler ditampilkan ke LCD 16x2 dan disimpan ke dalam SD card. Sensor tegangan [7] menggunakan prinsip kerja sesuai dengan Hukum Kirchoff II [8][9] seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 3. Resistor bernilai 30 kΩ dan 7,5 kΩ dirangkai secara seri kemudian V_{out} (V_o) Sensor diambil pada resistor 7,5 kΩ. Variabel V_i adalah tegangan input dari Output turbin angin dengan maksimum pembacaan sebesar 25 volt. Jadi Ketika V_i menerima Tegangan sebesar 25 volt, maka V_o akan bernilai 5 volt. Semakin kecil tegangan yang masuk ke V_i , semakin kecil juga nilai V_o



Gambar 3. Rangkaian Sensor Tegangan

$$V_o = \frac{7,5 \text{ k}\Omega}{30 \text{ k}\Omega + 7,5 \text{ k}\Omega} \times V_i$$

$$V_o = \frac{7,5 \text{ k}\Omega}{30 \text{ k}\Omega + 7,5 \text{ k}\Omega} \times 25$$

$$V_o = 5 \text{ volt}$$

2.2. Perancangan Algoritma Kontrol

Hasil pembacaan sensor tegangan, dihitung selisihnya dengan nilai set point / nilai Target sehingga akan menghasilkan nilai error. Sesuai persamaan 1, dimana variable ‘aktual’ adalah nilai tegangan hasil pembacaan sensor.

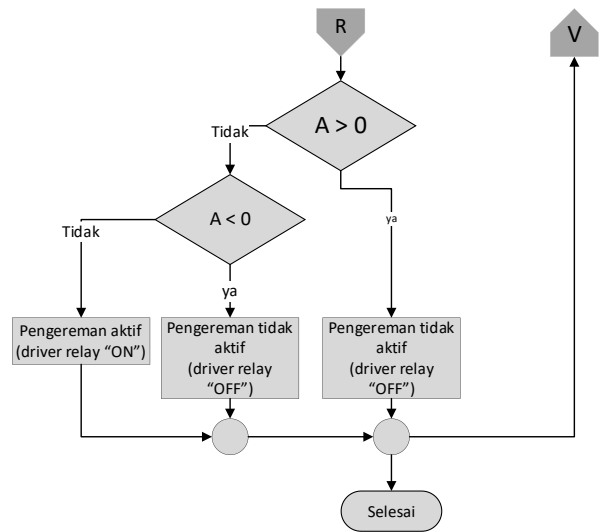
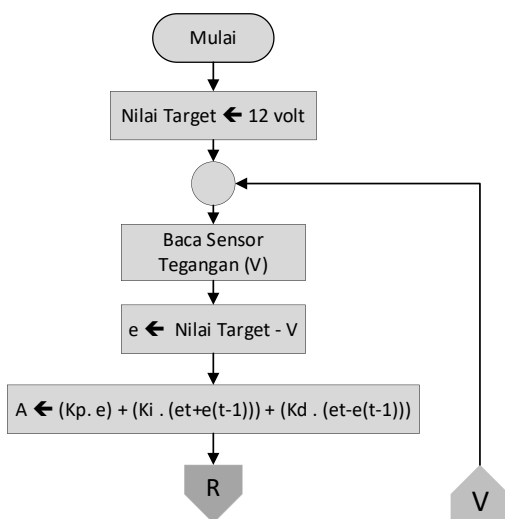
$$e = \text{set point} - \text{aktual} \quad (1)$$

Nilai error disimbolkan dengan huruf *e* menjadi input Mikrokontroler dan dimasukkan ke dalam persamaan algoritma kontrol menggunakan kontrol Proporsional Integral dan Derivative (PID) [10-12] sesuai persamaan 2.

$$A = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2)$$

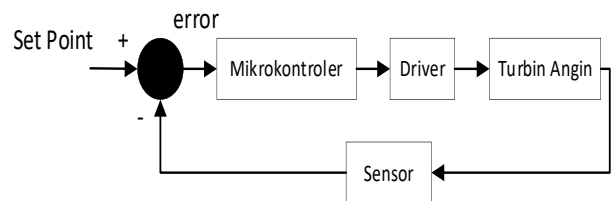
Konstanta *K_p* dikalikan dengan nilai error aktual, *K_i* dikalikan dengan jumlah error aktual dengan error sebelumnya, dan nilai *K_d* dikalikan dengan selisih error actual dengan error sebelumnya. Selanjutnya hasil perkalian dari ketiganya, dijumlahkan dan menghasilkan nilai *A*.

Algoritma Kontrol PID dimasukkan ke dalam Mikrokontroler modul Arduino UNO yang diprogram menggunakan Bahasa C. Alur program Arduino ditunjukkan melalui gambar flowchart pada Gambar 4 [13][14].

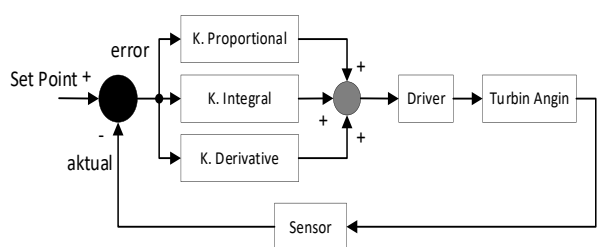


Gambar 4. Rangkaian Sensor Tegangan

Semakin cepat putaran turbin angin, semakin besar tegangan yang dihasilkan [15][16]. Secara umum, tegangan output turbin angin akan disimpan ke dalam baterai dengan tegangan sebesar 12 volt. Oleh karena itu, dalam sistem kontrol [17][18], nilai Target / set point ditentukan sebesar 12 volt. Output tegangan turbin angin, diatur supaya nilai tegangan maksimalnya adalah sebesar 12 volt. Nilai error dihitung sesuai persamaan 1 dan persamaan 2 sehingga menghasilkan nilai *A*. Nilai *A* masuk kedalam bagian seleksi kondisi, menentukan kapan pengereman aktif dengan cara mengaktifkan driver yang dihubungkan dengan turbin angin seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 5. Blok diagram system control PID ditunjukkan pada Gambar 6



Gambar 5. Blok diagram sistem control

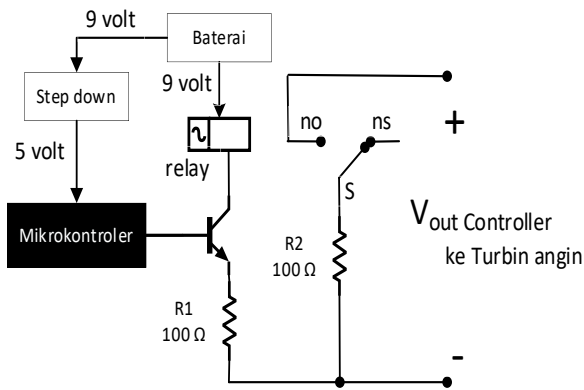


Gambar 6. Blok diagram sistem kontrol PID

Seperti yang ditunjukkan dalam persamaan 2. Nilai *A* adalah output kontrol PID yang terdiri dari hasil penjumlahan

kontrol P, kontrol I dan kontrol D. Sehingga Blok diagram pada Gambar 5 dapat dijabarkan menjadi blok diagram pada Gambar 6.

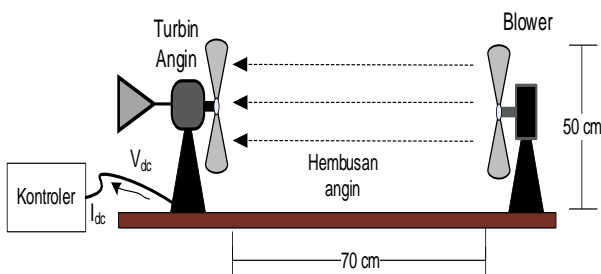
Vout Controller dihubungkan dengan output turbin angin. Ketika posisi saklar relay pada posisi seperti yang ditunjukkan dalam gambar 7, maka turbin angin akan berputar bebas atau dapat dikatakan control belum aktif. Akan tetapi, jika control aktif, maka saklar "S" relay akan berpindah dari "ns" menuju "no". Sehingga kutub "+" dan "-" turbin angin terhubung ke R2. Kemudian, tegangan turbin angin akan turun sampai mencapai 12 volt. Jika kurang dari 12 volt, maka posisi S akan Kembali lagi ke posisi "no". Rangkaian driver relay ditunjukkan pada Gambar 7



Gambar 7. Rangkaian driver relay

3. Hasil dan Pembahasan

Turbin angin diletakkan berhadapan langsung dengan blower dengan tinggi 50 cm berjarak 70 cm terhadap turbin angin. Blower diaktifkan dengan kecepatan angin maksimal yaitu sebesar 5,5 m/s sehingga menggerakkan bilah turbin angin yang berputar sebesar 3120 rpm seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 8. Kecepatan angin blower dan putaran turbin angin berturut-turut diukur menggunakan anemometer digital dan tachometer digital.

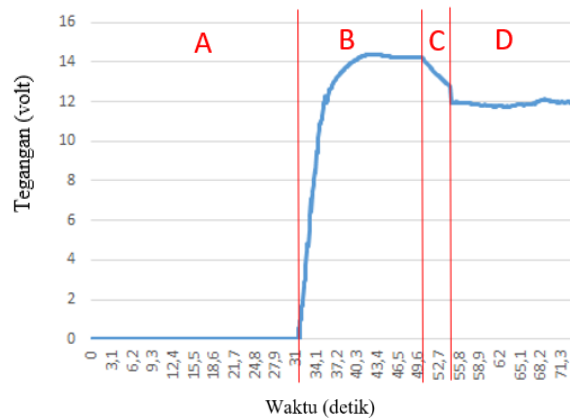


Gambar 8. Peletakan turbin angin dan blower

Sesuai dengan blok diagram pada gambar 1. Output turbin angin dihubungkan dengan sensor tegangan, kemudian

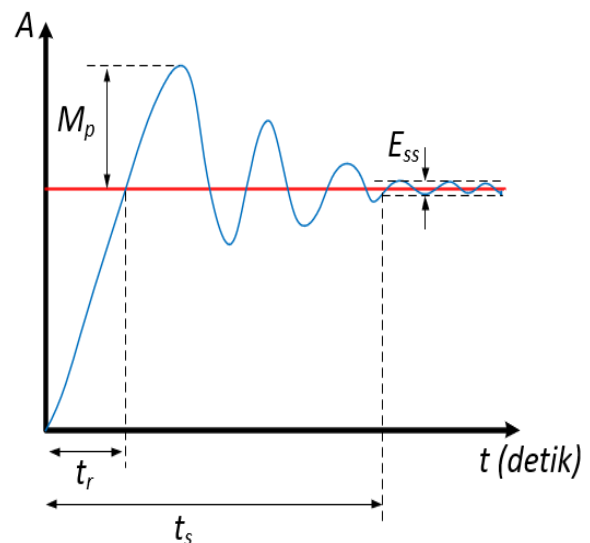
diproses menggunakan mikrokontroler dan ditampilkan ke LCD Display berukuran 16x2 serta disimpan ke dalam SD Card. Hasil data digambarkan dalam bentuk grafik seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 9.

Gambar grafik pada Gambar 8, terlihat bahwa pada daerah A nilai tegangan bernilai nol karena blower belum dinyalakan dan turbin belum berputar. Pada daerah B, Blower dan turbin mulai aktif, terlihat ada kenaikan tegangan sampai pada tegangan 14,5 volt. Selanjutnya pada daerah C, kontrol turbin angin mulai aktif. Sistem mengatur turbin angin supaya tegangan yang dihasilkan mencapai nilai target/set point yaitu sebesar 12 volt. Pada daerah tersebut terlihat tegangan turbin angin mulai mengalami penurunan sampai nilai 12 volt. Sistem kontrol terus diaktifkan sampai pada daerah D



Gambar 9. Grafik Hasil Respon Sistem Kontrol

Berdasarkan hasil data tersebut, dapat dianalisis repon waktu sistem kontrol [19][20] menggunakan 4 parameter kontrol seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 9. Grafik parameter pengukuran respon system ditunjukkan pada Gambar 10



Gambar 10. Grafik Parameter pengukuran respon sistem

Dimana :

- Rise Time (t_r), waktu ketika sistem naik menuju nilai target pertama kali.
- Settling time (t_s), waktu Ketika sistem mulai naik sampai pada kondisi akhir mencapai nilai target / set point.
- Maximum Overshoot (M_p), nilai lonjakan yang terbesar dari nilai target / set point.
- Error Steady State, (E_{ss}), nilai error sistem ketika tidak dapat mencapai tepat pada nilai target / set point.

Hasil analisis respon sistem ditunjukkan pada Tabel 1. Sistem mencapai kondisi steady state membutuhkan waktu 23,2 detik. Dengan nilai Error Steady State sebesar 2,08 %

Tabel 1. Hasil Respon System

Parameter	Nilai
Rise Time (t_r)	4,2 detik
Settling Time (t_s)	5 detik
Maximum Overshoot	0,3 volt
Error Steady State (E_{ss})	2,08 %

Pengukuran parameter pada tabel 1 berdasarkan gambar grafik pada gambar 9 didaerah C dan D. Ketika dilakukan pengereman, sistem dapat mencapai nilai set point pada waktu 5 detik dengan nilai Maximum Overshoot yang sangat kecil yaitu sebesar 0,3 volt dan *error steady state* nya sebesar 2,08%. Nilai Hasil pengukuran akan semakin baik jika nilainya semakin mendekati nol. Seperti penelitian yang dilakukan oleh Fahriannur [21], membangun kontrol pengereman pada turbin angin dengan nilai error steady state sebesar 6,62%.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian, dapat disimpulkan bahwa Turbin Angin yang didalamnya dibangun sistem kontrol, berhasil melakukan pengereman secara elektrik dengan cara mendeteksi *output* tegangan DC turbin angin. Ketika sistem kontrol diaktifkan Turbin angin yang awalnya menghasilkan tegangan sebesar 14,5 volt hingga turun mencapai tegangan 12 volt dalam waktu 5 detik (*settling time*) dengan nilai *error steady state* sebesar 2,08%.

Referensi

- [1] Pambudi, N.A.; Ulfa, D.K.; Nanda, I.R.; Gandidi, I.M.; Wiyono, A.; Biddinika, M.K.; Rudiyanto, B.; Saw, L.H. The Future of Wind Power Plants in Indonesia: Potential, Challenges, and Policies. *Sustainability*, Vol. 17, No. 1312. Hal. 1 – 27. 2025.
- [2] Pristandaru D L, Nugroho AP. Wind Energy in Indonesia: Current Status, Potential, Challenge, Opportunities, and Future Policy. *Indonesian Journal of Energy*. Vol. 2. No. 2 Hal. 65-73. 2019
- [3] Mergawi O, Mahmoud M, Ayman A. Literature Review On Wind Turbines Braking Systems. *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology*. Vol 11. No.2. Hal. 74-79. 2024
- [4] Sutikno T, Syahid H W, Rizky A A, Arsyad C S, Auzani J. An Automatic Wind Turbine Braking System on PLTH Bayu Baru through a Fuzzy Logic Controller. *Jurnal Nasional Teknik Elektro*. Vol. 11 No. 1. Hal. 1 – 7. 2022
- [5] Mammadov, Nijat. Analysis of Systems and Methods of Emergency Braking of Wind Turbine. *International Science Journal of Engineering & Agriculture*. Vol.2 No.2 Hal. 147-152. 2023
- [6] Rodriguez, Ortiz Edgardo. Luis E C, Diego A A. Alex D S. Control System With Electronic Braking Capabilities For Micro Wind Turbines. *Proc. SPIE 12513, Energy Harvesting and Storage: Materials, Devices, and Applications XIII*, 125130E 2023
- [7] Putra I K A, I Nyoman SK, I G A Putu R A. Rancang Bangun Sistem Monitoring Tegangan, Arus, dan Kecepatan Mobil Listrik Agnijaya Weimana. *Jurnal Spektrum* Vol. 10. No. 4. Hal. 205-215. 2023
- [8] Anugrah D. Penerapan Hukum Kirchoff dan Hukum Ohm pada Analisis Rangkaian Listrik Menggunakan Software Electronics Workbench. *Journal of System, Information Technology, and Electronics Engineering*. Vol. 2. No. 2. Hal. 1 – 11. 2022
- [9] Lase, Dermawanda. Joice S M. Analisis Literatur Tentang Hukum Kirchoff Dalam Desain Rangkaian Listrik Modern. *IDENTIK. Jurnal Ilmu Ekonomi, Pendidikan dan Teknik*. Vol. 2 No. 2. Hal. 15 -21. 2025
- [10] E. S. Ghith and F. A. A. Tolba, Design and Optimization of PID Controller using Various Algorithms for Micro-Robotics System, *J Robot Control (JRC)*, vol. 3, no. 3, Hal. 244–256. 2022
- [11] So, Gun-Baek. Design of Linear PID Controller for Pure Integrating Systems with Time Delay Using Direct Synthesis Method. *Processes*. Vol. 10, No. 5. Hal. 1 – 17. 2022
- [12] Ariyansyah, Qolil, Alfian M. DC Motor Speed Control with Proportional Integral Derivative (PID) Control on the Prototype of a Mini-Submarine. *Journal of Fuzzy Systems and Control* Vol. 1 No. 1. Hal. 18 – 24
- [13] Zhou, Yi. A Summary of PID Control Algorithms Based On AI-Enabled Embedded Systems. *Hindawi Security and Communication Networks*. Vol. 1 No. 7. Hal. 1-7. 2022

- [14] Efendi, Mas. Feri C. Design and Implementation of Arduino-Based PID Control System for Water Level Regulation Using Ultrasonic Sensors. *Journal of Ocean, Mechanical and Aerospace Science and Engineering*. Vol. 69 No. 1. Hal. 57-64. 2025
- [15] Chen, Shizhe, Yushang Wu, Shixuan Liu, Yingdong Yang, Xiaozheng Wan, Xianglong Yang, Keke Zhang, Bo Wang, and Xingkui Yan. Development of Electromagnetic Current Meter for Marine Environment. *Journal of Marine Science and Engineering*. Vol. 11, no. 1. Hal. 1-17. 2023
- [16] Peilun Y, Lihua T, Zhongjie L, Cuipeg X, Zifan L, Kean C. Harnessing ultra-low-frequency vibration energy by a rolling-swing electromagnetic energy harvester with counter-rotations. *Applied Energy*. Vol. 377, Part B. Hal. 1 – 18. 2025
- [17] Susatyo M H, Muhammad Y M. Implementation of PI-Controlled Closed-Loop System for Mecanum Wheel Coordination in an Omni-Directional Robot. *Journal of Electrical Technology UMY*. Vol. 7 No.2. Hal. 76-81. 2023
- [18] Azim F,Auliah U, Jufrizel, Ahmad F. Implementasi Kendali PID pada kecepatan Motor DC Sebagai Media Pembelajaran Berbasis Arduino dan Labview. *Journal if Telecommunication, Electronics, and Control Engineering (JTECE)*. Vol. 6 No.2 Hal. 139-151. 2024
- [19] Ogata, Katsuhiko. *Modern Control Engineering* 5th edition. Pearson Education. ISBN 10:0-13-615673-8. 2010
- [20] A. Fahriannur, R. G. Putra, and D. E. Rahmanto, Perancangan Kontrol Zoom Pada Kamera Ptz Untuk Aplikasi Object Tracking, *Transmisi: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, vol. 25, no. 2, pp. 58-63, Mei. 2023.
- [21] Fahriannur, Ahmad. dkk. Pengembangan Sistem Pengereman Turbin Angin Sumbu Horizontal Menggunakan Kontrol Pid. *Jurnal Teknologi Terapan (JTT)*, Vol. 10, No. 2, Hal. 146-153. 2024