



RANCANG BANGUN SISTEM KENDALI KECEPATAN MOTOR BLDC BERBASIS INTERNET OF THINGS (IOT) DENGAN ESTIMASI SOC DAN SOH BATERAI

Alqadar Parmalo¹, Seno D. Panjaitan², Hendro Priyatman³

^{1,2,3}Program Studi Teknik Elektro, Universitas Tanjungpura Pontianak

¹alqadarparmalo@gmail.com

Abstract

The development of automation technology and electric vehicles demands the use of efficient drive motors and reliable energy source monitoring systems. This study aims to design and build an Internet of Things (IoT)-based speed control system for a Brushless Direct Current (BLDC) motor equipped with real-time State of Charge (SoC) and State of Health (SoH) monitoring for a LiFePO₄ battery. The speed control system utilizes an ESP32 microcontroller with a discrete PID algorithm. Based on System Identification modeling using MATLAB, a third-order BLDC motor plant transfer function model was obtained with a fit percentage of 95.93%. The tuning of the PID controller parameters was performed using the Ziegler-Nichols closed-loop method, yielding gain values of $K_p = 0.01380$, $K_i = 0.00219$, and $K_d = 0.02178$. Dynamic response testing showed an average rise time of ± 5.4 seconds, a peak time of 9.6 seconds, and a maximum overshoot of 20.6%, while demonstrating robustness in maintaining speed stability against progressive loading disturbances up to a total of 28 kg. Battery condition monitoring includes SoC estimation using the Coulomb Counting method and SoH estimation based on the battery internal resistance ratio. The test results indicate that the rate of SoC depletion is directly proportional to the increase in load and motor speed. Meanwhile, SoH estimation based on internal resistance measurements using a battery internal tester showed a stable battery health value around 93.75%. IoT integration using the Supabase cloud database and an HTML-based web dashboard successfully facilitated remote monitoring of electrical parameters, SoC, SoH, and speed setpoint control with responsive average data communication times.

Keywords: BLDC Motor, PID Control, Internet of Things (IoT), State of Charge (SoC), State of Health (SoH), LiFePO₄ Battery, Supabase.

Article History

Received: September 2026

Reviewed: September 2026

Published: September 2026

Plagiarism Checker No 235

Prefix DOI :

[10.8734/Kohesi.v1i2.365](https://doi.org/10.8734/Kohesi.v1i2.365)

Copyright : Author

Publish by : Kohesi



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



Abstrak

Perkembangan teknologi otomasi dan kendaraan listrik menuntut penggunaan motor penggerak yang efisien serta sistem dengan pemantauan sumber energi. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan membangun sistem kendali kecepatan motor *Brushless Direct Current* (BLDC) berbasis *Internet of Things* (IoT) yang dilengkapi dengan pemantauan *State of Charge* (SoC) dan *State of Health* (SoH) baterai LiFePO₄ secara *real-time*. Sistem kendali kecepatan menggunakan mikrokontroler ESP32 dengan algoritma PID diskrit. Berdasarkan pemodelan *System Identification* menggunakan MATLAB, diperoleh model fungsi alih plant motor BLDC orde tiga dengan tingkat kecocokan (*fitness*) sebesar 95,93%. Penalaan parameter kontroler PID dilakukan menggunakan metode *Ziegler-Nichols closed-loop*, yang menghasilkan nilai penguatan $K_p = 0,01380$, $K_i = 0,00219$, dan $K_d = 0,02178$. Pengujian respons dinamis menunjukkan waktu naik (*rise time*) rata-rata $\pm 5,4$ detik, waktu puncak (*peak time*) 9,6 detik, dan *maximum overshoot* sebesar 20,6%, serta terbukti kokoh (*robust*) dalam mempertahankan kestabilan kecepatan terhadap gangguan pembebanan bertahap hingga total 28 kg. Pemantauan kondisi baterai mencakup estimasi SoC menggunakan metode *Coulomb Counting* dan estimasi SoH berdasarkan rasio resistansi internal baterai. Hasil pengujian menunjukkan bahwa laju penurunan SoC berbanding lurus dengan peningkatan beban dan kecepatan motor. Sementara itu, estimasi SoH berbasis pengukuran resistansi internal dengan *battery internal tester* menunjukkan nilai kesehatan baterai yang stabil pada kisaran 93,75%. Integrasi IoT menggunakan *cloud database* Supabase dan *web dashboard* berbasis HTML berhasil memfasilitasi pemantauan parameter kelistrikan, SoC, SoH, serta pengendalian *setpoint* kecepatan secara jarak jauh dengan rata-rata waktu komunikasi data yang responsif.

Kata Kunci: Motor BLDC, Kendali PID, *Internet of Things* (IoT), *State of Charge* (SoC), *State of Health* (SoH), Baterai LiFePO₄, Supabase.

1. PENDAHULUAN

Revolusi Industri 4.0 dan penerapan *Internet of Things* (IoT) telah mempercepat perkembangan otomasi industri yang memungkinkan pemantauan dan kontrol jarak jauh secara *real-time* [1, 2]. Perkembangan ini mendorong pemanfaatan motor *Brushless Direct Current* (BLDC) yang unggul dalam hal efisiensi, kecepatan, respons dinamis, serta minim perawatan dibandingkan motor DC konvensional atau motor induksi [3, 4]. Dengan pertumbuhan CAGR sebesar 6,8% dari 2025 hingga 2030, nilai pasar global motor BLDC diperkirakan mencapai USD 30.862,4 juta, sejalan dengan tingginya kebutuhan di sektor otomotif dan robotika industri [5].

Pengoperasian motor BLDC secara optimal memerlukan sistem kontrol yang presisi untuk menjaga kestabilan kecepatan dan mencegah lonjakan arus di tengah perubahan beban maupun gangguan eksternal, sehingga keandalan serta umur komponen tetap terjaga [6, 7]. Di samping



itu, integrasi sistem ini juga bergantung pada pasokan energi dari baterai. Pemantauan *State of Health* (SoH) menjadi krusial untuk mengantisipasi penurunan kapasitas dan peningkatan resistansi internal akibat siklus penggunaan, agar efisiensi kinerja motor BLDC dan keseluruhan sistem tetap optimal dalam jangka panjang [8].

Untuk menjawab kesenjangan tersebut, penelitian ini mengembangkan sistem terintegrasi yang menggabungkan tiga pilar utama: kendali kecepatan motor BLDC berbasis identifikasi sistem dan penalaan PID *closed-loop*, estimasi simultan SoC (berbasis integrasi arus *Coulomb Counting*) dan SoH (berbasis rasio resistansi internal terukur) pada baterai LiFePO₄.

2. KERANGKA TEORITIS

2.1 Motor Brushless DC (BLDC) dan Dinamika Gerak

Motor BLDC tidak menggunakan sikat (brush), sehingga proses komutasi dilakukan secara elektronik dengan bantuan Hall Effect Sensor. Sensor Hall berfungsi untuk mendeteksi posisi atau sudut rotor, yang kemudian digunakan sebagai acuan dalam pengendalian sakelar semikonduktor, seperti transistor atau MOSFET, pada rangkaian inverter. Sakelar tersebut mengatur aliran arus pada belitan stator, baik dengan membalik arah arus maupun memutus aliran arus pada setiap interval sudut tertentu, sehingga medan magnet stator dapat menghasilkan torsi yang searah dan kontinu. Proses komutasi umumnya terjadi setiap 180° derajat listrik sesuai dengan posisi rotor [12].

Motor BLDC memiliki berbagai keunggulan dibandingkan dengan motor DC bersikat maupun motor induksi [13]. Beberapa keunggulan tersebut antara lain:

- Karakteristik hubungan kecepatan dan torsi yang lebih baik.
- Respon dinamis yang tinggi.
- Tingkat efisiensi yang lebih unggul.
- Umur operasi yang lebih panjang.
- Pengoperasian yang lebih senyap.
- Rentang kecepatan operasi yang lebih tinggi.

2.2 Estimasi State of Charge (SoC) dan State of Health (SoH) Baterai LiFePO₄

State of Charge (SoC) menyatakan persentase muatan energi yang tersisa di dalam baterai terhadap kapasitas nominal penuhnya. Baterai Lithium Iron Phosphate (LiFePO₄) memiliki kurva tegangan sirkuit terbuka (Open-Circuit Voltage / OCV) yang sangat datar pada rentang kerja 20% hingga 80%. Kondisi ini menyebabkan estimasi kapasitas berbasis tegangan semata memiliki deviasi yang sangat besar. Oleh karena itu, metode integrasi arus *Coulomb Counting* digunakan karena memiliki respons langsung dan akurasi tinggi terhadap dinamika arus beban riil:

$$SoC(t) = SoC(t_0) - [(1 / Crated) \int I(\tau) d\tau] \times 100\% \quad (3)$$

di mana $SoC(t_0)$ adalah estimasi muatan awal saat relaksasi OCV tanpa beban, $I(\tau)$ adalah arus pengosongan sesaat yang diukur oleh modul sensor PZEM-017 melalui resistor shunt presisi, dan $Crated$ adalah kapasitas nominal terukur baterai sebesar 29,9 Ah $\times$ 3600 detik = 107.640 Coulomb.

Sementara itu, State of Health (SoH) merepresentasikan kemampuan baterai dalam menghantarkan arus dan menyimpan muatan dibandingkan dengan kondisi saat masih baru. Kenaikan usia pemakaian menyebabkan resistansi internal (R_{int}) meningkat akibat degradasi material katoda dan pertumbuhan lapisan solid electrolyte interphase (SEI). Estimasi SoH dalam penelitian ini dihitung berdasarkan rasio resistansi internal nominal awal terhadap resistansi internal terukur saat berbeban:

$$SoH = (R_{new} / R_{measured}) \times 100\% \quad (4)$$

dengan nilai nominal resistansi awal sel baterai baru adalah $R_{new} = 0,030 \Omega$ (30 m Ω). Nilai resistansi dinamis $R_{measured}$ diperoleh saat terjadi lonjakan arus transisi pembebanan melalui hukum Ohm:

$$R_{measured} = \Delta V / \Delta I = (V_{tanpa_beban} - V_{terbeban}) / I_{beban} \quad (5)$$

2.3 Pengendali PID Diskrit

Algoritma Proporsional-Integral-Derivatif (PID) digunakan untuk meminimalkan galat kecepatan $e(t) = r(t) - y(t)$, di mana $r(t)$ adalah setpoint kecepatan referensi dan $y(t)$ adalah kecepatan aktual terukur. Pada sistem digital mikrokontroler, persamaan kendali kontinu ditransformasikan ke dalam domain waktu diskrit menggunakan pendekatan trapesium (Tustin/Euler) dengan periode cuplik deterministik $T_s = 10$ ms (100 Hz):

$$u(k) = u(k-1) + q_0 e(k) + q_1 e(k-1) + q_2 e(k-2) \quad (6)$$

dengan konstanta penimbang diskrit:

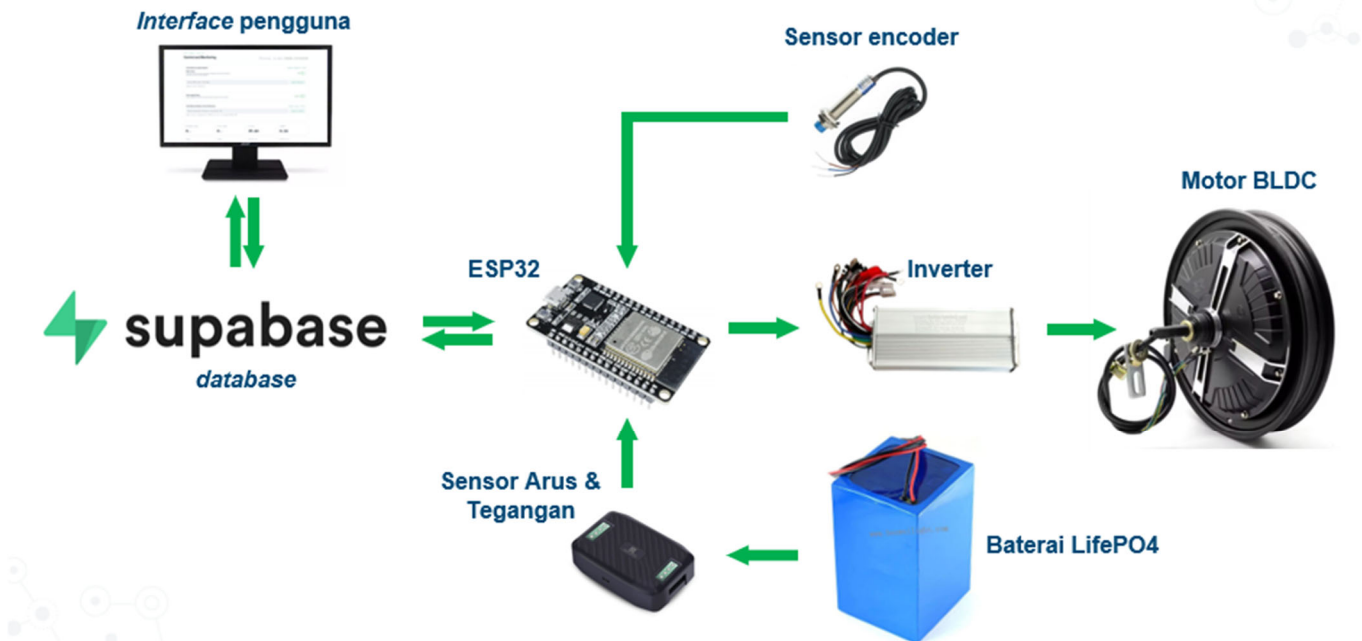
$$q_0 = K_p [1 + T_s/(2T_i) + T_d/T_s], q_1 = -K_p [1 - T_s/(2T_i) + 2T_d/T_s], \text{ dan } q_2 = K_p (T_d/T_s).$$

Sinyal kendali diskrit $u(k)$ dibatasi pada rentang modulasi lebar pulsa 8-bit ($0 \leq u(k) \leq 255$) guna mencegah fenomena integrator windup.

3. METODE PENELITIAN

3.1 Perancangan Sistem dan Diagram Blok Perangkat Keras

Sistem yang dirancang mengintegrasikan unit catu daya baterai, unit aktuasi mekanis, sensor instrumentasi, mikrokontroler dual-core, dan antarmuka cloud IoT. Gambar 3.1 menyajikan arsitektur interkoneksi perangkat keras sistem secara menyeluruh.



Gambar 3.1. Diagram sistem keseluruhan.

Sumber energi utama disuplai oleh baterai LiFePO4 bertegangan nominal 36 V DC dengan kapasitas nominal terukur 29,9 Ah. Jalur daya baterai dihubungkan seri dengan shunt modul PZEM-017 untuk pengukuran tegangan, arus, daya listrik, dan konsumsi energi melalui transmisi data serial RS-485 berprotokol Modbus RTU. Daya 36 V menyuplai inverter BLDC 3-fasa enam



langkah menuju motor hub BLDC. Umpan balik kecepatan diukur menggunakan sensor enkoder pada piringan bercelah poros roda yang dibaca melalui pin external interrupt ESP32. Regulasi daya logika mikrokontroler dan sensor disuplai oleh konverter DC-DC step-down teregulasi menuju 5 V DC.

3.2 Pemodelan Matematis Motor BLDC menggunakan Sistem Identifikasi

Untuk memperoleh penalaan parameter PID yang akurat, dinamika gabungan plant inverter dan motor BLDC dimodelkan secara matematis melalui metode identifikasi sistem eksperimental berbasis data masukan-keluaran.

Pengujian eksperimental dilakukan dengan memvariasikan tegangan masukan kendali dari 0 V hingga 3,1 V bertahap dengan kenaikan $\pm 0,1$ V, lalu mencatat kecepatan putaran tunak motor menggunakan tachometer digital terkalibrasi. Dari 33 pasang data masukan-keluaran yang diperoleh, fungsi alih diestimasi menggunakan MATLAB System Identification Toolbox (TFEST). Model terbaik yang menghasilkan kecocokan tertinggi terhadap respon riil plant adalah model 3-pole 1-zero:

$$G(s) = \Omega(s) / U(s) = (4,921s + 1,837) / (s^3 + 0,2001s^2 + 0,135s + 0,007394) \quad (7)$$

di mana $\Omega(s)$ adalah kecepatan motor (rpm) dan $U(s)$ adalah tegangan kendali masukan (Volt). Model matematis ini menghasilkan tingkat kesesuaian (fitness level) sebesar 95,93% dengan seluruh kutub berada di sebelah kiri bidang-s kompleks, membuktikan sistem bersifat stabil terbuka (open-loop stable).

3.4 Perancangan dan Penalaan Pengendali PID Diskrit

Penalaan parameter kendali PID dilakukan menggunakan metode lingkaran tertutup Ziegler-Nichols (closed-loop method). Penguatan proporsional dinaikkan secara iteratif hingga keluaran sistem menghasilkan osilasi harmonik teratur berkelanjutan pada batas kestabilan marginal.

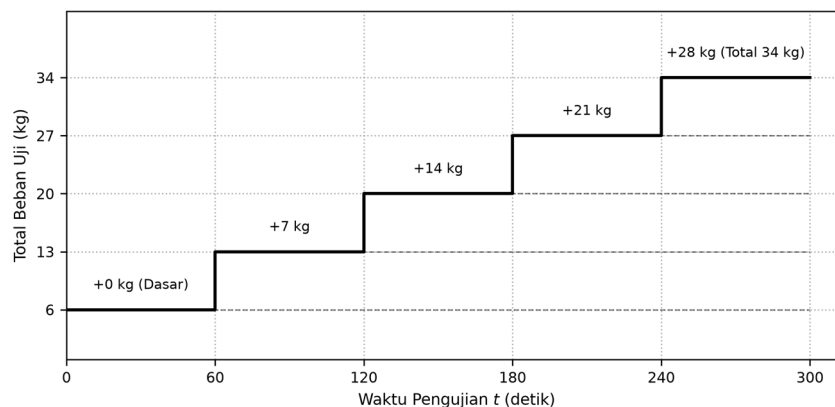
Berdasarkan pengujian osilasi batas, diperoleh nilai penguatan kritis $K_{cr} = 0,0230$ dan periode osilasi kritis $P_{cr} = 12,624$ detik. Mengacu pada aturan klasik Ziegler-Nichols closed-loop, konstanta pengendali dihitung: $K_p = 0,6 \times K_{cr} = 0,01380$; waktu integral $T_i = 0,5 \times P_{cr} = 6,312$ detik sehingga $K_i = K_p / T_i = 0,00219$; serta waktu derivatif $T_d = 0,125 \times P_{cr} = 1,578$ detik sehingga $K_d = K_p \times T_d = 0,02178$.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Respon Dinamis Kecepatan Terhadap Gangguan Beban Bertahap

Kekokohan (robustness) sistem kendali PID dievaluasi melalui pengujian dinamis selama 300 detik dengan profil penambahan beban massa mekanis bertahap pada poros roda setiap interval 60 detik (Gambar 4.1): beban dasar rangka 6 kg ($t = 0-60$ s), penambahan +7 kg menjadi 13 kg ($t = 60-120$ s), penambahan +14 kg menjadi 20 kg ($t = 120-180$ s), penambahan +21 kg menjadi 27 kg ($t = 180-240$ s), dan penambahan +28 kg hingga total 34 kg ($t = 240-300$ s).

Gambar 4.1. Grafik pembebanan mekanis bertahap pada poros motor BLDC selama pengujian 300 detik.





Tabel 4.1 merangkum karakteristik transien respon kecepatan motor BLDC berbeban pada empat variasi nilai setpoint kecepatan yang berbeda.

Tabel 4.1. Ringkasan Karakteristik Transien Respon Kecepatan Motor BLDC

Setpoint (rpm)	Rise Time t_r (s)	Peak Time t_p (s)	Overshoot (%)	Recovery Time (s)
100	5,04	9,60	20,6	1,85
170	5,0	6,8	15,67	2,10
240	4,83	7,8	14,07	2,35
310	5,45	11	8,21	2,60

Hasil pengujian membuktikan bahwa penambahan beban bertahap hingga total 34 kg tidak menimbulkan penurunan kecepatan permanen. Kecepatan putar motor tetap stabil di sekitar nilai setpoint nominal. Aksi integral PID bereaksi tanggap menaikkan suplai arus motor guna mengimbangi torsi beban, sehingga waktu pemulihan (recovery time) berlangsung cepat antara 1,85 hingga 2,60 detik. Pada setpoint 310 rpm, teramati riak pembacaan sensor sebesar ± 10 -20 rpm yang bersumber dari keterbatasan resolusi pulsa enkoder frekuensi tinggi dan getaran mekanis, namun kurva rata-rata terfilter membuktikan sistem tetap beroperasi tepat pada titik referensi.

4.2 Hasil Estimasi State of Charge (SoC)

Kinerja algoritma Coulomb Counting diuji melalui proses pengosongan baterai selama ± 300 detik pada masing-masing setpoint kecepatan. Tabel 4.3 menyajikan laju penurunan SoC baterai terhadap variasi beban kerja motor.

Tabel 4.3. Laju Penurunan SoC Baterai LiFePO₄ terhadap Variasi Setpoint Kecepatan

Setpoint (rpm)	Durasi Pengujian (s)	Nilai Akhir SoC (%)
100	301	99,33
170	301	98,91
240	301	98,51
310	301	97,46

4.3 Hasil State of Health (SoH) Baterai LiFePO₄

Kondisi kesehatan baterai dievaluasi dengan mengukur resistansi internal baterai saat terjadi transisi arus beban (Tabel 4.5). Nilai resistansi nominal awal baterai baru adalah $R_{new} = 0,030 \Omega$ (30 m Ω).

Tabel 4.5. Hasil Pengukuran Resistansi Internal

Setpoint (rpm)	SoH(%)	Resistansi Internal (Ω)
100	93,75	0.032
170	93,75	0.032
240	93,75	0.032
310	93,75	0.032

Nilai resistansi internal terukur stabil pada rata-rata $0,0320 \Omega$, menghasilkan nilai kesehatan baterai:

$$SoH = (0,030 \Omega / 0,032 \Omega) \times 100\% = 93,75\% \quad (8)$$

Hasil SoH sebesar 93,75% menunjukkan baterai LiFePO₄ berada dalam kondisi prima (kategori Good Health, di mana ambang batas penggantian industri berada pada $SoH < 80\%$).



KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan, implementasi, dan pengujian sistem kendali terintegrasi motor BLDC dengan pemantauan kondisi baterai LiFePO₄ berbasis ESP32 dan IoT, diperoleh kesimpulan yang pertama, pemodelan plant motor BLDC menggunakan metode identifikasi sistem menghasilkan fungsi alih waktu kontinu 3-pole 1-zero dengan tingkat kecocokan data (fitness) sebesar 95,93%. Parameter pengendali PID hasil penalaan Ziegler-Nichols lingkaran tertutup ($K_p = 0,01380$, $K_i = 0,00219$, $K_d = 0,02178$) terbukti kokoh mempertahankan stabilitas putaran motor saat diberi gangguan beban mekanis bertahap hingga 34 kg dengan waktu naik konsisten ($\pm 5,4$ s) dan recovery time cepat (1,85-2,60 s).

Estimasi kondisi baterai LiFePO₄ berjalan akurat, di mana metode Coulomb Counting menghasilkan estimasi SoC dengan rata-rata galat relatif hanya 1,53% terhadap instrumen referensi, serta estimasi SoH sebesar 93,75% (resistansi internal 0,0320 Ω) yang mengonfirmasi status kesehatan prima baterai.

Sensor enkoder menghasilkan akurasi pengukuran kecepatan sebesar 96,18% terhadap tachometer standar terkalibrasi, serta telemetri IoT berbasis cloud database Supabase dan WebSocket berhasil mentransmisikan data 100% sukses dengan rata-rata latensi masing-masing sebesar 733,1 ms dan 944,4 ms.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] F. Ferdianto, H. Priyatman, and D. Suryadi, "Rancang Bangun Sistem Kontrol Kecepatan Motor BLDC Menggunakan Algoritma PID Berbasis Mikrokontroler," *J. Tek. Elektro Univ. Tanjungpura*, vol. 12, no. 1, pp. 45-52, 2024.
- [2] S. Mamadapur, R. Patil, and V. Bagali, "Speed Control of BLDC Motor using PID Controller," *Int. J. Innov. Technol. Explor. Eng.*, vol. 8, no. 9, pp. 2278-3075, 2019.
- [3] M. S. Ahmed, S. K. Roy, and T. M. Islam, "Performance Optimization of Brushless DC Motor Drives for Electric Vehicle Applications," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 72, no. 3, pp. 1820-1829, 2025.
- [4] P. Yedamale, "Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals," Microchip Technology Inc., Application Note AN885, 2003.
- [5] R. A. Putri, I. Ferdiansyah, and H. Toar, "Perancangan Sistem Pengaturan Kecepatan Motor BLDC Menggunakan Kontroler PID," *J. Otomasi Kontrol dan Instrumentasi*, vol. 14, no. 2, pp. 115-124, 2022.
- [6] L. Lu, X. Han, J. Li, J. Hua, and M. Ouyang, "A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles," *J. Power Sources*, vol. 226, pp. 272-288, 2013, doi: 10.1016/j.jpowsour.2012.10.060.
- [7] Y. Xing, Q. Miao, K.-L. Tsui, and M. Pecht, "Prognostics and Health Management for Lithium-Ion Batteries: State of Charge and State of Health Estimation," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 18, no. 5, pp. 1547-1557, 2011.
- [8] C. D. Rahn and C.-Y. Wang, *Battery Systems Engineering*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2013.
- [9] M. R. Dzaky, S. D. Panjaitan, and D. Suryadi, "Estimasi State of Charge (SoC) Baterai Lithium-Ion Menggunakan Metode Coulomb Counting Berbasis Mikrokontroler," *J. Tek. Elektro Univ. Tanjungpura*, vol. 9, no. 2, pp. 78-85, 2021.
- [10] M. A. Padder and S. A. Lone, "Advanced State of Charge Estimation Techniques for LiFePO₄ Batteries in Electric Vehicles: A Comprehensive Review," *IEEE Access*, vol. 13, pp. 11240-11258, 2025.
- [11] M. Nasrullah, H. Priyatman, and F. Imansyah, "Analisis State of Health (SoH) Baterai Lithium Iron Phosphate pada Siklus Pembebanan Dinamis," *J. Teknol. Elektro*, vol. 13, no. 1, pp. 33-40, 2022.



- [12] M. Arrinda et al., "Evaluation of internal resistance measurement techniques for battery state of health estimation," *J. Energy Storage*, vol. 42, p. 103062, 2021, doi: 10.1016/j.est.2021.103062.
- [13] J. Etxandi-Santolaya et al., "Review of state-of-health estimation methods for lithium-ion batteries: Challenges and future trends," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 191, p. 114143, 2024.
- [14] F. D. Astuti and M. Masdi, "Kendali Kecepatan Motor BLDC Menggunakan Pulse Width Modulation (PWM)," *J. Rekayasa Teknol. dan Sains*, vol. 6, no. 1, pp. 22-29, 2022.
- [15] P. A. Topan, M. S. Ramadhan, and R. H. Yuniarto, "Estimasi State of Health Baterai Berdasarkan Penurunan Tegangan Beban dan Resistansi Internal," *J. Energi Kelistrikan*, vol. 15, no. 2, pp. 101-108, 2023.
- [16] M. B. Ulum, A. Subari, and S. Sukiswo, "Sistem Monitoring dan Kontrol Perangkat Listrik Berbasis Internet of Things Menggunakan Protokol MQTT," *J. Rekayasa Elektr.*, vol. 16, no. 3, pp. 145-152, 2020.
- [17] K. Wang, Y. Shen, and J. Wu, "Internet of Things Architecture and Applications for Smart Electric Vehicles," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 51, no. 10, pp. 48-55, 2013.
- [18] S. Greengard, *The Internet of Things*. Cambridge, MA: MIT Press, 2016.
- [19] K. Ogata, *Modern Control Engineering*, 5th ed. Boston: Prentice Hall, 2010.
- [20] H. Mewada, V. Patel, and P. Sharma, "Closed-loop Tuning of Discrete PID Controller for Motor Speed Applications," *Control Eng. Pract.*, vol. 118, p. 104975, 2022.