

MONITORING TORSI MOTOR BLDC SKALA LABORATORIUM

Tryandro Putra Priyatman¹, Seno Darmawan Panjaitan², Hendro Priyatman³

^{1,2,3}Universitas Tanjungpura Pontianak

¹bgs78116@gmail.com

Abstrak

Motor Brushless Direct Current (BLDC) merupakan salah satu jenis motor listrik yang banyak digunakan pada berbagai aplikasi industri dan penelitian karena memiliki efisiensi tinggi, umur pakai yang panjang, serta kebutuhan perawatan yang rendah. Dalam kegiatan praktikum dan penelitian di laboratorium, pemantauan nilai torsi motor BLDC secara *real-time* sangat penting untuk mengetahui karakteristik kerja motor pada berbagai kondisi pembebanan. Namun, proses pengukuran torsi masih banyak dilakukan secara manual sehingga kurang efektif dalam memperoleh data yang akurat dan berkesinambungan. Sistem yang dikembangkan menggunakan sensor arus PZEM-017, sensor proximity sebagai pendukung analisis konsumsi daya, serta mikrokontroler ESP32 sebagai pusat pemrosesan data dan media komunikasi. Data hasil pengukuran diproses oleh ESP32 dan ditampilkan pada antarmuka monitoring sehingga memudahkan pengguna dalam melakukan pengamatan dan pengambilan data. Metode penelitian meliputi tahap perancangan perangkat keras, perancangan perangkat lunak, integrasi sistem, pengujian sensor, serta pengujian keseluruhan sistem pada beberapa variasi pembebanan motor BLDC. Dengan demikian, sistem yang dirancang dapat digunakan sebagai media praktikum maupun penelitian untuk mendukung analisis motor BLDC secara lebih efektif dan efisien. Hasil pengujian menunjukkan bahwa penambahan beban mekanis memengaruhi parameter operasional motor BLDC, di mana peningkatan beban berbanding lurus dengan kenaikan arus dan torsi terhitung pada *setpoint* kecepatan 100, 200, dan 300 RPM. Sistem monitoring berbasis IoT berhasil merekam dinamika respon transien saat motor awal berjalan maupun kondisi tunak (*steady-state*) terhadap variasi pembebanan 2-20 kg secara kuantitatif pada setiap perubahan beban per kilogram.

Kata kunci: Motor BLDC, Torsi, ESP32, PZEM-017, Laboratorium

Article History

Received: September 2026

Reviewed: October 2026

Published: October 2026

Plagiarism Checker No.:

237.u873247.fh8374

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/)



Abstract

The Brushless Direct Current (BLDC) motor is widely used in various industrial and research applications due to its high efficiency, long service life, and low maintenance requirements. In laboratory-based practical work and research, real-time monitoring of BLDC motor torque is crucial for understanding the motor's operating characteristics under various loading conditions. However, torque measurement is often still performed manually, making it less effective for obtaining accurate and continuous data. The developed system utilizes, a PZEM-017 current sensor to support power consumption analysis, and an ESP32 microcontroller as the central unit for data processing and communication. Measurement data is processed by the ESP32 and displayed on a monitoring interface, facilitating user observation and data acquisition. The research methodology encompasses hardware design, software design, system integration, sensor testing, and overall system testing across various BLDC motor load conditions. Consequently, the designed system serves as a valuable tool for practical work and research, enabling more effective and efficient analysis of BLDC motor. Test results show that increasing mechanical load directly affects the operational parameters of the BLDC motor, where higher load leads to an increase in current and estimated torque across speed setpoints of 100, 200, and 300 RPM. The system successfully monitored quantitative changes in speed, current, and torque per kilogram of load (2-20 kg) during both transient start-up and steady-state conditions.

Keywords: BLDC Motor, Torque, ESP32, PZEM-017, Laboratory.

PENDAHULUAN

Sistem *monitoring* motor BLDC dapat dikembangkan dengan memanfaatkan *Internet of Things (IoT)* untuk memperoleh dan menampilkan data selama motor beroperasi. Perubahan beban dapat memengaruhi kecepatan aktual motor sehingga kondisi operasinya perlu dipantau. Dalam penelitian ini, kendali PID digunakan pada perangkat pengujian untuk mengatur kecepatan motor berdasarkan nilai referensi. Fokus penelitian diarahkan pada monitoring dinamika torsi akibat perubahan beban dan kecepatan aktual motor, sedangkan perancangan sistem kendali kecepatan tidak menjadi fokus utama.

Dibandingkan motor DC konvensional, motor BLDC memiliki keunggulan berupa efisiensi tinggi, torsi besar, kebutuhan perawatan yang rendah, serta kemampuan kendali kecepatan dan posisi yang lebih presisi. Penelitian ini bertujuan merancang dan mengimplementasikan sistem monitoring torsi motor BLDC pada skala laboratorium. ESP32 digunakan untuk mengolah data dan menghitung estimasi torsi, sedangkan hasilnya ditampilkan melalui antarmuka monitoring. Data dikirimkan melalui jaringan Wi-Fi untuk mendukung pemantauan selama pengujian.

Motor Brushless DC (BLDC) adalah salah satu beban yang digunakan dalam bidang industri. Dalam pengoperasian motor BLDC, kecepatan putaran motor tidak konstan dan dapat jauh berkurang karena adanya beban yang harus dipikul oleh motor. Motor BLDC memiliki



keunggulan dibandingkan motor DC konvensional, antara lain efisiensi tinggi, torsi awal tinggi, karakteristik kecepatan dan torsi linier, ukuran kompak, serta densitas daya tinggi. Namun, pada saat beroperasi dengan perubahan beban, kecepatan putaran motor dapat berubah dan kondisi kerja motor menjadi sulit diketahui secara langsung. Oleh karena itu, diperlukan suatu sistem monitoring torsi motor BLDC skala laboratorium yang mampu mengakuisisi, mengolah, dan menampilkan data torsi secara real-time sehingga karakteristik kerja motor terhadap perubahan beban dan kecepatan dapat diketahui dengan lebih mudah.

Pembuatan dan penerapan sistem pengawasan torsi motor BLDC berskala laboratorium menjadi fokus yang ingin dicapai dalam penelitian ini dan untuk memantau perubahan torsi terhadap variasi beban dan kecepatan putaran. Modul PZEM-017 digunakan untuk membaca tegangan dan arus, sedangkan sensor proximity menghasilkan pulsa yang diolah menjadi kecepatan aktual motor. ESP32 mengolah parameter tersebut untuk menghitung estimasi torsi. Hasil pengolahan ditampilkan melalui antarmuka monitoring, dengan pengiriman data melalui jaringan Wi-Fi.

Penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar pengembangan aplikasi komersial, seperti sistem otomasi pabrik. Permasalahan yang dikaji adalah bagaimana merancang sistem monitoring torsi motor BLDC skala laboratorium yang mampu mengakuisisi, mengolah, dan menampilkan estimasi torsi secara real-time. Sistem tersebut digunakan untuk mengamati perubahan kondisi kerja motor pada variasi beban dan kecepatan, dengan kendali PID sebagai bagian dari perangkat pengujian.

Ruang lingkup penelitian dibatasi pada monitoring estimasi torsi motor BLDC menggunakan teknologi IoT. Parameter utama yang dipantau adalah estimasi torsi, dengan parameter pendukung berupa tegangan baterai, arus baterai, arus beban, daya, dan kecepatan putaran aktual. Arus beban dihitung dari selisih arus terukur dan offset arus sistem sebesar 2,75 A. Perhitungan estimasi torsi menggunakan konstanta efisiensi motor sebesar 0,85. Pengujian dilakukan dengan asumsi bahwa motor berada dalam kondisi baik dan tidak mengalami kerusakan mekanis, serta lingkungan laboratorium bebas dari interferensi elektromagnetik yang signifikan.

TINJAUAN PUSTAKA

Motor listrik adalah motor yang sumber tenaganya berasal dari listrik AC ataupun DC. Pada saat ini semakin banyak penggunaan motor listrik sebagai ganti dari motor bahan bakar fosil, hal ini dikarenakan bahan bakar fosil suatu saat akan habis berdasarkan eksploitasi yang terjadi. Penggunaan motor listrik pada saat ini banyak diaplikasikan pada Unmanned Aerial Vehicle (UAV). Kemampuan terbang UAV yang terbatas dikompensasi dengan penggunaan motor listrik karena bentuknya yang kompak, performa yang baik, serta lebih ramah lingkungan karena tidak menimbulkan emisi.

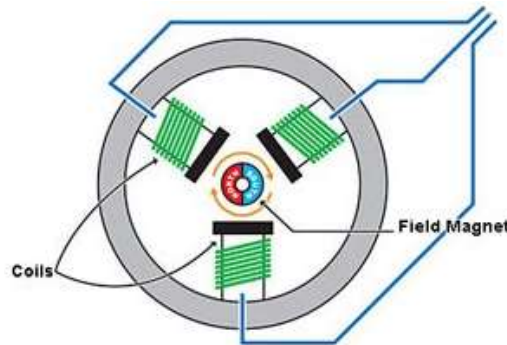
Motor Brushless DC (BLDC) tidak menggunakan brush atau sikat dalam proses komutasi. Motor ini digunakan pada aplikasi yang membutuhkan keandalan dan efisiensi tinggi, dengan kemampuan menghasilkan torsi besar dan rentang RPM tinggi. BLDC termasuk motor sinkron karena medan magnet stator dan rotor berputar pada frekuensi yang sama.

Inverter tiga fasa mengubah sumber listrik DC menjadi suplai untuk menggerakkan motor BLDC. Elektromagnet terdapat pada stator, sedangkan magnet permanen terdapat pada rotor. Putaran motor dijelaskan melalui interaksi magnet: kutub berbeda saling menarik dan kutub sama saling menolak. Kontroler mengatur arus stator untuk menghasilkan putaran.

Pada tipe outrunner, stator berada di dalam dan rotor di luar sehingga bagian luar motor berputar. Pada tipe inrunner, stator berada di luar dan rotor di dalam sehingga bagian dalam motor berputar. Rotor adalah bagian pada motor yang berputar karena adanya gaya elektromagnetik dari stator. Pada motor BLDC, bagian rotornya berbeda dengan motor DC konvensional, karena tersusun dari hingga delapan pasang kutub magnet permanen berbentuk

persegi panjang yang saling direkatkan menggunakan epoxy dan tidak memiliki brushless (sikat). Sementara itu, stator terdiri dari 12 belitan (elektromagnet) yang bekerja secara elektromagnetik.

Gambar 1. Motor BLDC



Sumber: <https://www.motioncontroltips.com>

Performa BLDC dikaitkan dengan kemampuan menghasilkan gaya untuk mengangkat beban dan konsumsi energi baterai. Gaya dorong dijelaskan melalui pengukuran menggunakan thrust meter dan timbangan, kemudian pembacaannya dikalikan dengan percepatan gravitasi. Indikator performa meliputi gaya dan pembebanan, torsi, kecepatan putaran, serta konsumsi daya listrik.

Gaya menggambarkan kemampuan memikul beban; peningkatannya disebut disertai kebutuhan daya lebih tinggi. Torsi (T) menggambarkan kemampuan gaya putar pada poros. Kecepatan (N), dalam RPM, menunjukkan respons putaran pada kondisi tanpa beban dan berbeban. Daya listrik (P) menggambarkan penggunaan daya dari baterai atau catu daya, dengan tegangan dan arus sebagai parameter kelistrikannya. Internet of Things (IoT) memungkinkan komunikasi dan pertukaran data antar perangkat. Dalam penelitian ini, ESP32 mengirimkan data melalui Wi-Fi menuju antarmuka HMI/dashboard. Kendali PID digunakan pada perangkat pengujian untuk mengatur kecepatan; fokus penelitian tetap pada monitoring dinamika torsi.

Torsi menyatakan kemampuan gaya menghasilkan gerak putar. Besarnya ditentukan oleh gaya dan lengan gaya, dengan satuan newton meter (Nm). Pada BLDC, torsi terbentuk melalui interaksi medan magnet stator yang dibangkitkan arus kumparan dan medan magnet permanen rotor. Dalam penelitian ini, torsi diestimasi secara tidak langsung karena keterbatasan biaya sensor torsi fisik. PZEM-017 membaca tegangan dan arus, sedangkan sensor proximity menghasilkan pulsa untuk perhitungan RPM. ESP32 menghitung estimasi torsi dari parameter tersebut.

Arus beban dihitung sebagai $I_{\text{beban}} = I - I_{\text{sistem}}$, dengan offset arus sistem 2,75 A dan konstanta efisiensi 0,85. Data ditampilkan melalui antarmuka monitoring. Pengujian menggunakan variasi beban dan kecepatan untuk mengamati perubahan estimasi torsi. Hubungan daya listrik, efisiensi, dan daya mekanik digunakan dalam perhitungan:

$$P_{\text{mekanik}} = P_{\text{listrik}} \times \text{EFISIENSI} \\ (2\pi \times N \times T)/60 = V \times I_{\text{beban}} \times \text{EFISIENSI} \quad (2.1)$$

Penyusunan ulang Persamaan (2.1) menghasilkan:

$$T = \frac{(V \times I_{\text{beban}} \times \eta \times 60)}{(2\pi \times N)} \quad (2.2)$$

Keterangan:

T	= torsi (Nm)
V	= tegangan (V)
I	= arus (A)
I _{beban}	= arus beban (A)
η	= Efisiensi motor
N	= kecepatan aktual (RPM)

Sensor arus dan tegangan mengukur parameter kelistrikan untuk diolah mikrokontroler. Sensor proximity mendeteksi objek tanpa kontak; pulsa keluarannya diolah ESP32 menjadi RPM. Arduino merupakan platform open-source untuk elektronika dan otomasi. Dalam tugas akhir, Arduino IDE digunakan untuk pemrograman, sedangkan ESP32 menjadi unit pemroses.

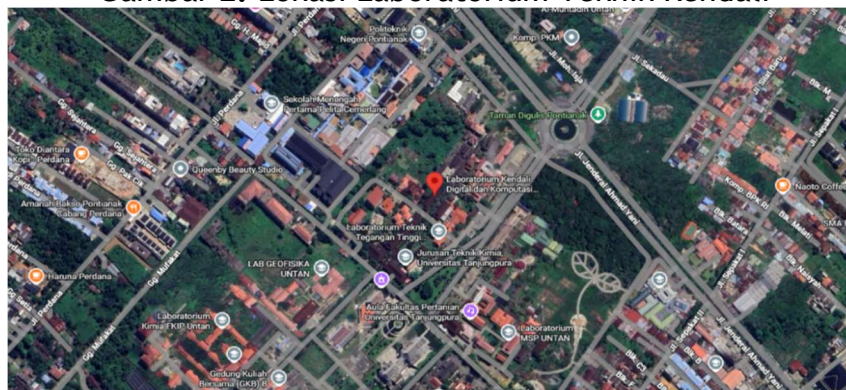
Tabel 1. Penelitian terdahulu

No.	Peneliti	Tahun	Judul Penelitian	Hasil Utama	Relevansi
1	Ferdyanto, Gumilang Fatwa, Augusta Erlangga, dan Idris Marbawi	2021	Monitoring Kecepatan Motor DC Berbasis IoT	Sistem dapat menampilkan kecepatan motor secara real-time melalui aplikasi Blynk	Menjadi dasar pengembangan sistem monitoring parameter motor
2	Katsuhiko Ogata	2022	Rancang Bangun Sistem Pengukuran Torsi Motor BLDC Pengukuran	torsi menggunakan sensor strain gauge dengan akurasi 95%	Menjadi acuan metode pengukuran torsi pada penelitian ini
3	Young Liu	2023	Sistem IoT untuk Pemantauan Motor BLDC di Laboratorium	Sistem dapat memantau arus, tegangan, dan kecepatan melalui platform ThingSpeak	Relevan karena meneliti motor BLDC berbasis IoT

METODE PENELITIAN

Penelitian dilaksanakan pada April-September 2026 di Laboratorium Teknik Kendali, Fakultas Teknik, Universitas Tanjungpura. Kegiatan meliputi penentuan variabel, perancangan, pembuatan alat, pengujian, pengumpulan dan analisis data, serta penulisan. Tahapan meliputi observasi, studi pustaka, perancangan, dan pengujian pada variasi beban serta kecepatan. Pengujian ulang dilakukan jika hasil belum memenuhi kebutuhan.

Gambar 2. Lokasi Laboratorium Teknik Kendali



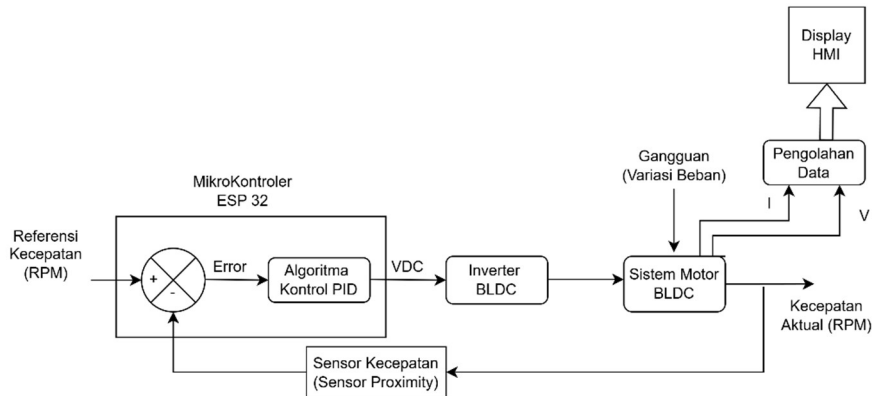
Tahapan meliputi observasi, studi pustaka, perancangan, dan pengujian pada variasi beban serta kecepatan. Pengujian ulang dilakukan jika hasil belum memenuhi kebutuhan.

Gambar 3. Diagram alir tahapan penelitian



Kendali PID digunakan sebagai sarana eksperimen, fokus penelitian adalah monitoring dinamika torsi akibat perubahan beban dan kecepatan aktual terhadap referensi. ESP32 mengolah selisih *setpoint* dan RPM aktual menjadi sinyal PWM untuk inverter.

Gambar 4. Diagram Blok Kendali Kecepatan Motor BLDC

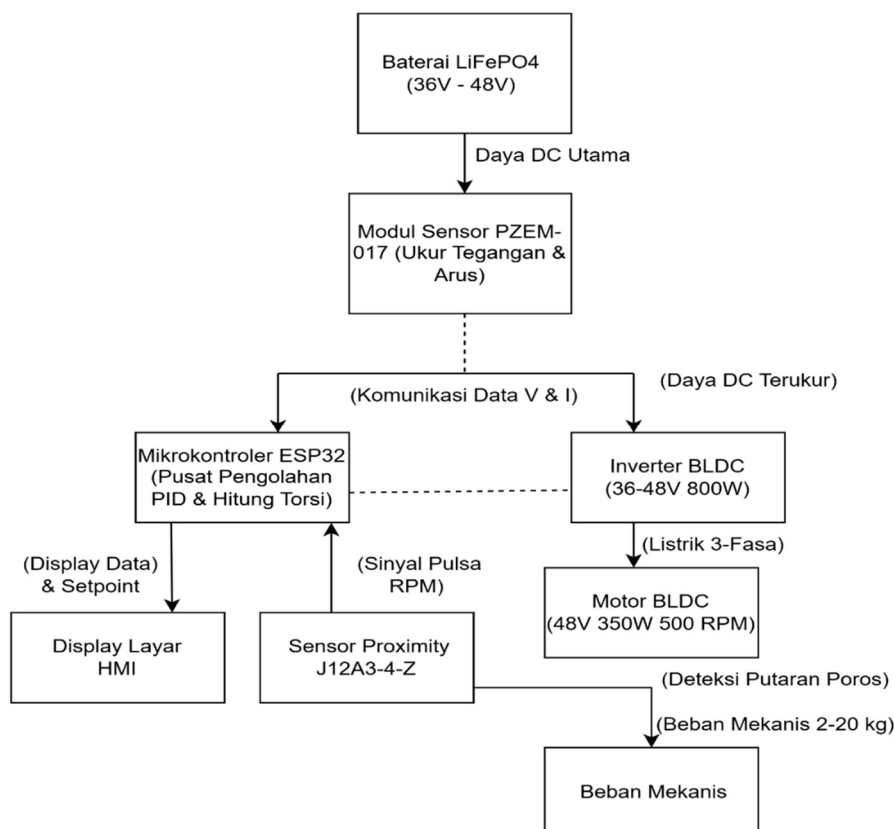


Baterai LiFePO4 menyuplai sistem. PZEM-017 membaca tegangan dan arus; proximity J12A3-4-Z menghasilkan pulsa pada perubahan HIGH ke LOW. Program mengasumsikan 16 pulsa/putaran dan menghitung $RPM = (\text{count}/16) \times (60/T_s)$, kemudian menerapkan filter EMA. Pengujian mencakup beban 2-10 kg dengan kenaikan 2 kg pada *setpoint* 100 dan 200 RPM, serta 4-20 kg dengan kenaikan 4 kg pada 100, 200, dan 300 RPM. Karena keterbatasan biaya sensor torsi fisik, torsi diestimasi dari tegangan, arus beban, RPM, dan efisiensi berdasarkan Persamaan (2.2). Arus beban dihitung menggunakan:

$$I_{\text{beban}} = I - I_{\text{sistem}}$$

Efisiensi ditetapkan sebesar 0,85 dan offset arus sistem sebesar 2,75 A. Data dikirim melalui Wi-Fi ke dashboard. Variabel meliputi tegangan baterai (V), arus baterai (A), *Speed PV* sebagai kecepatan aktual, *Speed SV* sebagai referensi kecepatan (RPM), dan arus beban.

Gambar 5. Diagram Skematik Pengujian Sistem Motor BLDC



Laptop digunakan untuk pemrograman, konfigurasi, pengolahan data, dan pemantauan. Arduino IDE versi 1.8.19 digunakan untuk mengembangkan dan mengunggah program ESP32.

Tabel 2. Spesifikasi Laptop Yang Digunakan

Nama Spesifikasi	Tipe Spesifikasi
TIPE LAPTOP	ROG Strix G513QM
Processor	AMD Ryzen 9 5900HX with Radeon Graphics (3.30 GHz)
RAM	16 GB
SSD	1 TB

Gambar 6. Laptop Untuk Program



Inverter mengubah sumber DC menjadi suplai tiga fasa untuk motor; spesifikasinya 36-48 V dan 800 W. Parameter motor dan baterai per sel disajikan dalam tabel.

Tabel 3. Parameter Motor BLDC

Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
Tegangan nominal	V	48	V
Arus nominal	I	7.2	A
Daya	P	350	W
Kecepatan nominal	ω	500	rpm

Gambar 7. Inverter Motor BLDC



Sumber: <https://www.ebay.com/itm/196048787477>

Gambar 8. Motor BLDC

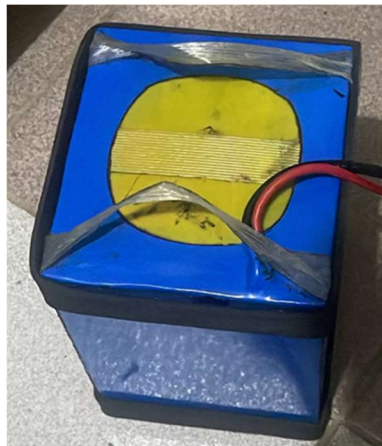


(Sumber: <https://id.made-in-china.com>)

Tabel 4. Spesifikasi Baterai per sel

Parameter	Nilai
Jenis kimia	LifePO4
Kapasitas nominal	15 Ah
Tegangan nominal	3,20 Volt
Tegangan maksimal	3,65 Volt
Tegangan <i>Cut-off</i> pengosongan	2,50 Volt
Resistansi internal	5 m Ω

Gambar 9. Baterai LifePO4



Kabel jumper menghubungkan komponen. ESP32 mengolah data kelistrikan dan RPM terfilter untuk menghitung estimasi torsi. Program menetapkan torsi nol saat RPM terfilter tidak positif untuk menghindari pembagian dengan nol.

Gambar 10. Kabel Jumper



Sumber: <https://id.serial-cable.com>

Gambar 11. ESP 32



Sumber: <https://raharja.ac.id/esp32-2/>

Gambar 12. Sensor Proximity



Sumber: <https://deltamitrasolusindo.com>

Gambar 13. Sensor PZEM - 017



(Sumber: <https://puaks.blogspot.com>)

Gambar 14. Software Arduino IDE



Sumber: <https://share.google/4zC3Xow5AslZrqCdu>

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Implementasi Sistem

Sistem pengendalian dan pemantauan motor Brushless Direct Current (BLDC) dikembangkan menggunakan beberapa perangkat lunak, yaitu Matlab, Arduino IDE, dan Visual Studio Code. Arduino IDE digunakan untuk menjalankan program pengendalian motor berbasis C++, sedangkan antarmuka monitoring dikembangkan menggunakan HTML. Sistem dirancang untuk membaca kecepatan putar motor, menghitung estimasi torsi, serta mengendalikan kecepatan berdasarkan nilai *setpoint*.

Pembacaan kecepatan motor dilakukan menggunakan interrupt sensor. Setiap perubahan sinyal dari kondisi HIGH ke LOW diproses sebagai pulsa yang kemudian dikonversi menjadi Revolutions Per Minute (RPM). Dalam program, satu putaran motor diasumsikan menghasilkan 16 pulsa sensor. Data RPM selanjutnya diproses menggunakan *Exponential Moving Average* sebagai *low-pass filter* untuk mengurangi fluktuasi pembacaan akibat noise.

Nilai torsi pada penelitian ini tidak diperoleh melalui pengukuran langsung menggunakan sensor torsi, tetapi diestimasi berdasarkan tegangan, arus beban, kecepatan putar aktual, dan efisiensi motor. Efisiensi ditetapkan sebesar 0,85 pada program ESP32, sedangkan arus sistem tanpa beban sebesar 2,75 A digunakan sebagai nilai offset.

Hasil Rancangan Perangkat Keras

Perangkat keras yang dikembangkan terdiri atas motor BLDC, sistem kontrol, sumber daya, sensor, dan Human-Machine Interface (HMI). Pengujian dilakukan dengan memberikan variasi beban berupa batu yang diangkat oleh mekanisme motor. Sistem secara bersamaan merekam tegangan, arus beban, RPM aktual, daya, dan estimasi torsi. Rancangan perangkat keras tersebut digunakan untuk menguji respons motor pada kondisi awal maupun keadaan tunak dengan variasi *setpoint* dan pembebanan.

Pengujian Torsi Awal

Pengujian awal dilakukan menggunakan beban 2-10 kg pada *setpoint* 100 dan 200 RPM. Ketika beban bertambah, motor membutuhkan energi lebih besar untuk mempertahankan putaran. Hal ini mengakibatkan tegangan baterai mengalami penurunan (misalnya dari 43,44 V menjadi 40,98 V pada *setpoint* 100 RPM). Karena RPM aktual menjadi nilai penyebut dalam persamaan torsi (T berbanding terbalik dengan N), ketika RPM aktual turun akibat pembebanan, nilai torsi hasil perhitungan/estimasi akan meningkat.

Pada *setpoint* 200 RPM, perubahan RPM lebih besar, yaitu antara 104,1 dan 229 RPM, sedangkan estimasi torsi berada pada rentang 6,256-11,236 Nm. Hasil tersebut menunjukkan bahwa peningkatan beban tidak selalu diikuti perubahan RPM, arus, maupun torsi secara linear. Salah satu penyebabnya adalah torsi dihitung menggunakan beberapa parameter yang berubah secara bersamaan, terutama RPM aktual yang berada pada penyebut persamaan.

Pengujian berikutnya dilakukan menggunakan beban 4-20 kg. Pada *setpoint* 100 RPM, estimasi torsi meningkat dari 8,934 menjadi 13,655 Nm. Pada *setpoint* 200 RPM, torsi berada pada rentang 7,616-9,330 Nm, sedangkan pada *setpoint* 300 RPM nilai torsi berada pada rentang



6,968-12,579 Nm. Pada beban 20 kg dan *setpoint* 300 RPM, RPM aktual turun menjadi 107,3 RPM sehingga menghasilkan estimasi torsi 12,579 Nm. Kondisi ini memperlihatkan bahwa kemampuan pengendali mempertahankan *setpoint* menurun pada pembebanan tertentu.

Pengujian pada Keadaan Tunak

Pada pengujian tanpa beban (beban rangka) dengan kecepatan 100 RPM, motor tetap menyerap daya sebesar 109,78 W untuk mengatasi kerugian mekanis dan elektrik. Torsi tanpa beban terhitung paling tinggi (14,727 Nm), hal ini konsisten dengan sifat berbanding terbalik antara torsi dan RPM pada persamaan yang digunakan, di mana RPM aktual pada kondisi awal ini masih relatif rendah (74,6 RPM) dan belum mencapai kestabilan penuh

Pengujian dengan beban 4-20 kg menunjukkan kecenderungan serupa. Pada *setpoint* 100 RPM, estimasi torsi turun dari 11,707 menjadi 7,875 Nm, sedangkan pada *setpoint* 300 RPM menurun dari 9,064 menjadi 5,361 Nm. Pada *setpoint* 300 RPM, RPM aktual berada pada rentang 284,9-331,1 RPM. Fluktuasi tersebut menunjukkan bahwa sistem PID belum selalu mempertahankan kecepatan tepat pada nilai referensi. Dalam program, perhitungan RPM dilakukan dengan asumsi bahwa satu putaran penuh menghasilkan 16 pulsa sensor

Hasil Pemantauan HMI

HMI digunakan untuk menampilkan data sistem secara *real-time*. Pada pengujian *setpoint* 100 RPM, layar menunjukkan kecepatan aktual 134 RPM dan estimasi torsi 7,13 Nm. Pada *setpoint* 200 RPM, kecepatan aktual mencapai 221 RPM dengan torsi 6,20 Nm. Sementara itu, pada *setpoint* 300 RPM diperoleh kecepatan aktual 329 RPM dan torsi 6,54 Nm.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa sistem telah mampu mengintegrasikan pembacaan kecepatan dan estimasi torsi dengan antarmuka pemantauan. Namun, selisih antara *reference speed* dan *actual speed* pada beberapa kondisi menunjukkan bahwa respons kendali masih mengalami *overshoot* atau *undershoot*.

Pembahasan Umum

Secara keseluruhan, sistem mampu melakukan pemantauan tegangan, arus, daya, RPM, dan estimasi torsi motor BLDC pada berbagai kondisi pembebanan. Estimasi torsi tidak menunjukkan hubungan linear terhadap kenaikan beban karena nilainya dipengaruhi secara bersamaan oleh tegangan, arus, efisiensi, dan RPM aktual.

Respons PID juga memengaruhi hasil karena kecepatan aktual pada beberapa kondisi belum mencapai keadaan stabil pada *setpoint* yang diberikan. Di samping itu, penggunaan nilai efisiensi motor yang dianggap konstan berpotensi menyebabkan deviasi hasil estimasi. Dengan demikian, sistem yang dikembangkan telah mampu melakukan estimasi dan pemantauan torsi motor BLDC secara *real-time*, tetapi interpretasi nilai torsi perlu mempertimbangkan karakteristik respons kendali dan parameter kelistrikan yang berubah selama pengujian.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan, pengujian, dan analisis, sistem monitoring torsi motor BLDC berbasis Internet of Things (IoT) skala laboratorium berhasil dirancang dan diimplementasikan dengan memanfaatkan sensor torsi, sensor arus PZEM-017, motor BLDC, serta mikrokontroler ESP32 sebagai pusat pengolahan data. Sistem mampu memantau parameter arus, tegangan, kecepatan putaran, dan torsi secara *real-time*, baik pada kondisi awal motor beroperasi maupun saat mencapai keadaan tunak, serta mengirimkan data melalui jaringan internet ke dashboard monitoring. Hasil pengujian menunjukkan bahwa peningkatan beban secara umum menyebabkan perubahan kecepatan putaran serta peningkatan arus dan torsi motor pada berbagai *setpoint* kecepatan. Sistem IoT juga mempermudah pemantauan jarak jauh dan penyimpanan data secara otomatis sehingga dapat dimanfaatkan sebagai sarana pembelajaran dan penelitian karakteristik motor BLDC. Untuk pengembangan selanjutnya, sistem dapat dilengkapi dengan fitur kontrol otomatis terhadap kecepatan dan torsi, penggunaan sensor torsi dengan akurasi yang lebih tinggi, serta database berbasis cloud untuk



penyimpanan dan analisis data jangka panjang. Selain itu, parameter seperti suhu, getaran, dan efisiensi daya dapat ditambahkan agar analisis performa motor lebih komprehensif, serta sistem dapat dikembangkan menuju skala industri untuk mendukung aplikasi otomasi dan monitoring motor listrik secara nyata.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. R. Hidayatulloh, "Estimasi Torsi pada Motor BLDC Menggunakan Pengukuran Arus dan Tegangan Berbasis Mikrokontroler," *Jurnal Elektronika dan Otomasi Industri*, vol. 9, no. 3, hal. 112-118, 2024.
- [2] A. Setyawan dan R. Budiarto, "Sistem Monitoring Torsi dan Kecepatan pada Motor DC Brushless Berbasis Internet of Things (IoT)," *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 11, no. 1, hal. 34-41, 2023.
- [3] S. Riyadi, "Pemantauan Kinerja dan Torsi Motor Listrik Berbasis Sensor Load Cell dan Rotary Encoder," *Majalah Ilmiah Teknologi Elektro*, vol. 20, no. 2, hal. 89-96, 2021.
- [4] P. C. Krause, O. Wasynczuk, dan S. D. Sudhoff, *Analysis of Electric Machinery and Drive Systems: Integrated Torque Equations*. New Jersey: IEEE Press/Wiley, 2013. (Buku referensi utama untuk persamaan matematis torsi).
- [5] D. Hanselman, *Brushless Permanent Magnet Motor Design*. Rhode Island: The Writers' Collective, 2003. (Buku referensi untuk memahami hubungan antara fluks magnetik, arus, dan torsi yang dihasilkan).
- [6] F. Rahman, dkk., "Analisis Hubungan Daya, Arus, dan Torsi pada Pengujian Motor BLDC Menggunakan Dynamometer," *Jurnal Rekayasa Sistem Tenaga*, vol. 5, no. 1, hal. 23-30, 2022.
- [7] Inc. Grand View Research, "Pertumbuhan dan Tren Pasar Motor DC Tanpa Sikat," Nov. 2024. [Online]. Available: <https://www.grandviewresearch.com/press-release/global-brushless-dc-motors-market#>.
- [8] Ferdianto, G. Fatwa, A. Erlangga, and I. Marbawi, "Performance Analysis of Permanent Magnet BLDC Motor for Reducing Cogging Torque Using Taguchi Method," Jakarta, Apr. 2024.
- [9] Ogata, K. (1997). *Teknik Kontrol Otomatis*. Jakarta: Erlangga.
- [10] Liu, Y. (2005). Kontrol torsi langsung penggerak DC tanpa sikat dengan pengurangan riak torsi. *Transaksi IEEE pada Aplikasi Industri*, 41(2), 599-608.
- [11] Rambabu, S. (2007). *Pemodelan dan Kontrol Motor DC Tanpa Sikat*. Tesis/Laporan Teknis.
- [12] Öztürk, SB (2008). Kontrol torsi langsung motor sinkron magnet permanen dengan back-EMF non-sinusoidal. *Prosiding Konferensi IEEE*.
- [13] Hendershot Jr., JR, & Miller, TJE (2010). *Desain Mesin Magnet Permanen Tanpa Sikat*. Florid
- [14] Jadhav, SV, Srikanth, J., & Chaudhari, BN (2010). Pengontrol cerdas yang diterapkan pada penggerak motor induksi berbasis SVM-DTC: Studi perbandingan. *Konferensi Internasional tentang Elektronik Daya, Penggerak, dan Sistem Energi*.
- [15] Prastiwi, W., Iskandar, E., & Effendie, R. (2012). Perancangan dan implementasi direct torque control 2 level inverter pada motor induksi. *Jurnal Teknik POMITS*,
- [16] Hiba, H., Ali, H., & Oathmen, H. (2021). Monitoring kecepatan motor DC berbasis IoT. *International Conference on Electrical Engineering*.
- [17] Mirzaei, H., Pahlavani, M. A., & Naderi, P. (2022). Rancang bangun sistem pengukuran torsi motor BLDC berbasis sensor strain gauge. *International Review on Modelling and Simulations*,
- [18] Mirzaei, H., Pahlavani, M. A., & Naderi, P. (2023). Sistem IoT untuk pemantauan motor BLDC di laboratorium. *International Review on Modelling and Simulations*,
- [19] P. Yedamale, "Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals," 2003.



- [20] Kurniawan, "Rancang Bangun Sistem Pengukuran Torsi Motor BLDC," Jurnal Teknik Instrumentasi, vol. 7, no. 2, hal. 55-61, 2022.